



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**DISEÑO DE UN BANCO DE
PRUEBAS PARA UN
EXOESQUELETO DE MIEMBRO
SUPERIOR**

Autor: Marcos Martínez Redondo

Tutor: M^aDolores Blanco Rojas

Septiembre 2011

A Wido

<u>CAPÍTULO I. PROYECTO HYPER.....</u>	<u>7</u>
<u>1.1. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO HYPER.....</u>	<u>8</u>
<u>1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO HYPER</u>	<u>9</u>
<u>1.3. ÁREA DE USO DE LA INVESTIGACIÓN (ENFERMEDADES COMPRENDIDAS DENTRO DEL RANGO DEL PROYECTO).....</u>	<u>10</u>
1.3.1. ACCIDENTE VASCULAR CEREBRAL (ACV)	10
1.3.2. LESIÓN DE LA MÉDULA ESPINAL (SCI)	10
1.3.3. PARÁLISIS CEREBRAL (PC)	11
<u>1.4. ESTADO DEL ARTE.....</u>	<u>12</u>
1.4.1. INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA	14
1.4.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS.....	14
1.4.3. ELEMENTOS DEL ROBOT INDUSTRIAL	16
1.4.3.1. Estructura mecánica [10].....	16
1.4.3.2. Sistema de transmisión	20
1.4.3.3. Actuadores [13].....	20
1.4.3.4. Sensores	25
1.4.3.5. Unidad de control.....	26
1.4.4. NEUROROBOTS	27
1.4.5. NEUROPRÓTESIS	28
1.4.6. TRABAJO CONJUNTO DE NEUROROBOTS Y NEUROPRÓTESIS [4].....	30
<u>1.5. OBJETIVOS DEL PROYECTO HYPER</u>	<u>31</u>
<u>1.6. TEMAS DE INVESTIGACIÓN.....</u>	<u>31</u>
1.6.1. BIOMECÁNICA	32
1.6.2. CONTROL NEUROMOTOR.....	32
1.6.2. TECNOLOGÍAS DE CONTROL	32
1.6.3. ACTUADOR, SENSOR Y LAS TECNOLOGÍAS DE ALIMENTACIÓN.....	32
1.6.4. MULTIMODAL INTERFACES CEREBRO MÁQUINA (MBMI)	33
1.6.5. ADAPTACIÓN DE LA PN Y NR A LOS USUARIOS Y LOS ESCENARIOS DE APLICACIÓN..	33
<u>1.7. ORGANISMOS IMPLICADOS EN EL PROYECTO HYPER</u>	<u>33</u>
 <u>CAPÍTULO II. OBJETIVOS DEL PROYECTO</u>	 <u>35</u>
<u>2.1. OBJETIVOS PROYECTO FIN DE CARRERA.....</u>	<u>36</u>
<u>2.2. INTERVENCIONES AFECTADAS POR EL PROYECTO FIN DE CARRERA</u>	<u>38</u>
 <u>CAPÍTULO III. BIOMECÁNICA DEL BRAZO</u>	 <u>42</u>
<u>3.1. INTRODUCCIÓN A LA BIOMECÁNICA.....</u>	<u>43</u>
3.1.1. ARTICULACIONES	43
<u>3.1.2. MÚSCULOS</u>	<u>44</u>
<u>3.2. DATOS ANTROPOMÓRFICOS</u>	<u>45</u>
<u>3.2.1. GRADOS DE LIBERTAD</u>	<u>45</u>



<u>3.2.2. RANGOS ARTICULARES</u>	45
<u>3.3. SISTEMA DE REFERENCIA Y NOMENCLATURA</u>	49
<u>3.4. ARTICULACIONES DEL BRAZO</u>	50
<u>3.4.1. HOMBRO</u>	50
<u>3.4.2. CODO</u>	55
<u>3.4.3. MUÑECA</u>	59

CAPÍTULO IV. DISEÑO CONCEPTUAL Y ESFUERZOS MECÁNICOS ESTÁTICOS EN EL BRAZO

<u>4.1. JUSTIFICACIÓN DE ESTE CAPÍTULO</u>	64
<u>4.2 DISEÑO CONCEPTUAL</u>	65
<u>4.3. MASAS Y LONGITUDES</u>	66
<u>4.4. MATERIALES UTILIZADOS EN LA MODELACIÓN</u>	66
<u>4.5. DIAGRAMAS DE FUERZAS Y MOMENTOS EN LA REPRESENTACIÓN CONCEPTUAL</u>	67
<u>4.5. TABLAS RESUMEN</u>	76

CAPÍTULO V. DISEÑO EN SOLID EDGE ST2 DEL EXOESQUELETO

<u>5.1. ¿QUÉ ES SOLID EDGE ST2?</u>	78
<u>5.2. FUNCIONAMIENTO DE SOLID EDGE ST2</u>	78
<u>5.2.1. LOS PRIMEROS PASOS EN SOLID EDGE</u>	78
<u>5.3. MODELADO DEL EXOBRAZO</u>	82
<u>5.3.1. DIBUJADO DE LOS BOCETOS A UTILIZAR</u>	82
<u>5.3.2. EXTRUSIÓN POSITIVA</u>	83
<u>5.3.3. BORRADO SECCIÓN</u>	83
<u>5.3.4. EXTRUÍDO DE LA BARRA VERTICAL</u>	84
<u>5.3.5. VACIADO POR EXTRUSIÓN</u>	84
<u>5.4. MODELADO DEL EXOANTEBRAZO</u>	85
<u>5.5. RODAMIENTO</u>	86
<u>5.6. ENSAMBLADO DEL MODELO COMPLETO</u>	86

CAPÍTULO VI. MODELADO Y SIMULADO EN MSC ADAMS DEL EXOESQUELETO

<u>6.1. ¿QUÉ ES ADAMS?</u>	90
<u>6.2. MODELADO DE LOS SÓLIDOS</u>	90
<u>6.3. PUNTOS CARACTERÍSTICOS DEL MODELO</u>	95
<u>6.4. CREACIÓN DE CONTROLADORES</u>	96
<u>6.5. COACCIONES, CONTORNOS Y RELACIONES ENTRE PIEZAS</u>	97

CAPÍTULO VII. SIMULACIÓN EN MSC ADAMS MEDIANTE MOTOR MATLAB

<u>7.1 ¿QUÉ ES MATLAB?</u>	100
---	-----



<u>7.2 ÚLTIMOS PASOS EN MSC.ADAMS. EXPORTADO.</u>	101
<u>7.2.1 CONFIGURACIONES EN ADAMS</u>	101
<u>7.2.2 EXPORTACIÓN DE INFORMACIÓN DESDE MSC.ADAMS</u>	101
<u>7.3 INICIO DE MATLAB</u>	103
<u>7.4 MÓDULOS DE MATLAB EN ADAMS SYS</u>	105
<u>4.4.1 BLOQUE DE CÁLCULO DE MATLAB</u>	105
<u>4.4.2 PID</u>	105
 <u>CAPÍTULO VIII. CÁLCULO DEL MODELO EN SITUACIONES COTIDIANAS</u>	 106
<u>8.1. INTRODUCCIÓN</u>	107
<u>8.2. MOVIMIENTOS CARACTERÍSTICOS</u>	107
<u>8.3. DISEÑO DE FUNCIONES PARA SU CONSTRUCCIÓN.</u>	109
<u>8.4. PROGRAMACIÓN DE MATLAB.</u>	111
<u>8.5. RESULTADOS.</u>	112
<u>8.6. CONCLUSIONES.</u>	113
<u>8.7. MOTORES COMERCIALES PROPUESTOS.</u>	114
 <u>CAPÍTULO IX. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS DOCENTES</u>	 115
<u>9.1. CONCLUSIONES</u>	116
<u>9.2. FUTUROS TRABAJOS DOCENTES.</u>	117
 <u>ANEXO A. JUSTIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS DEL RODAMIENTO</u>	 120
<u>A.1. INTRODUCCIÓN</u>	120
<u>A.2. RODAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS</u>	120
<u>A.2.1. EN CUANTO A DIMENSIONES:</u>	120
<u>A.2.2. CARGAS</u>	120
<u>A.2.3. LUBRICACIÓN</u>	120
<u>A.2.4. MASAS Y CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL</u>	121
<u>A.2.5 NOMENCLATURA</u>	122
<u>A.3. CÁLCULOS</u>	122
 <u>ANEXO B. GLOSARIO</u>	 125
<u>B.1. ANATOMÍA</u>	125
<u>B.2. MODELADO</u>	125
<u>B.3. OTROS</u>	126
 <u>ANEXO C. BREVE MANUAL DE MSC.ADAMS</u>	 127



C.1. CONTROLES BÁSICOS	128
C.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	130
C.2.1. Operaciones booleanas.....	132
C.2.2. Modificación de los Sólidos.....	133
C.2.3. Modificación de las especificaciones iniciales de los Sólidos.....	133
C.3. DISEÑO DE JUNTAS, ACTUADORES Y FUERZAS.	136
C.4. SIMULACIÓN DEL MODELO	142
C.5. POSTPROCESADOR	144

ANEXO D. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES..... 147

<u>D.A. FLEXOEXTENSIÓN DEL CODO. BRAZO EN POSICIÓN VERTICAL.</u>	147
<u>D.B. FLEXOEXTENSIÓN DEL CODO. BRAZO EN POSICIÓN HORIZONTAL</u>	150
<u>D.C. FLEXOEXTENSIÓN DEL HOMBRO. BRAZO EN POSICIÓN VERTICAL.</u>	153
<u>D.D. FLEXOEXTENSIÓN DEL HOMBRO. BRAZO EN POSICIÓN HORIZONTAL.</u>	157
<u>D.E. ELEVACIÓN DEL BRAZO.</u>	161
<u>D.F. ALARGAR EL BRAZO HACIA EL FRENTE CON OBJETO DE TOMAR ALGO CON LA MANO.</u>	166
<u>D.G. ELEVACIÓN LATERAL SIMPLE DEL BRAZO. ABDUCCIÓN.</u>	170
<u>D.H. ELEVACIÓN LATERAL COMPLEJA DEL BRAZO. ABDUCCIÓN DEL HOMBRO MÁS FLEXOEXTENSIÓN DEL CODO.</u>	174

ANEXO E. DOCUMENTACIÓN GRÁFICA 183

ÍNDICE DE IMÁGENES 184

ÍNDICE DE TABLAS 188

ÍNDICE DE GRÁFICAS..... 190

BIBLIOGRAFÍA..... 191







CAPÍTULO I. PROYECTO HYPER

1.1. Introducción al Proyecto Hyper

El desarrollo de este proyecto Fin de Carrera se enmarca en el proyecto HYPER, financiado en el programa CONSOLIDER-INGENIO 2010 del Ministerio de Ciencia e Innovación.



Imagen 1.1. Logotipo del Proyecto HYPER

El objetivo de este proyecto es servir de apoyo a uno de los pequeños subproyectos dentro del Proyecto Hyper. Este, como se verá de un modo más desarrollado, trata de dar apoyo a la recuperación de la capacidad motora en diversas enfermedades. Para ello se está ideando un exorobot de cuerpo completo capaz de movilizar cualquier cadena muscular comprendida en el Proyecto Hyper.

Este proyecto fin de carrera tratará de abordar la problemática de la articulación del codo para dar como resultado un primer modelo de exobrazo, que se construirá para utilizar en ensayos mecánicos, no con la finalidad que tendrá un diseño más refinado capaz de vestir a una persona, sino como banco de pruebas para futuras mejoras y obtención de datos en laboratorio.

Una vez finalizado el exoesqueleto completo, esta herramienta tendrá el propósito de ayudar a la rehabilitación de personas con dificultades en la movilidad.

Aunque el proyecto HYPER es muy ambicioso y abarca todo el cuerpo humano, en este Proyecto Fin de Carrera me centraré en el brazo humano, más concretamente en la articulación del codo, con objeto de no realizar un trabajo disperso y de bajo rendimiento global. Mientras trabajo en esta articulación, varios compañeros doctorandos en el RoboticsLab investigan para adaptar el proyecto a un dedo humano, para posteriormente trasladarlo a la mano completa.

1.2. Descripción del proyecto HYPER

El proyecto HYPER recibe su nombre del acrónimo en inglés de “Hybrid Neuroprosthetic and Neurobotic Devices for Functional Compensation and Rehabilitation of Motor Disorders”

En el documento “Memoria Técnica del Programa de Actividad Investigadora” del proyecto HYPER se expone [2]:

“El proyecto HYPER pretende representar un avance significativo en la investigación de dispositivos neurorobóticos y neuroprotésicos en interacción cercana con el cuerpo humano, tanto en la rehabilitación como en la compensación funcional de trastornos motores en actividades de la vida diaria. El proyecto centrará sus actividades en nuevos neurorobots “vestibles” y neuroprótesis que combinarán estructuras biológicas y artificiales con el objetivo de superar las principales limitaciones de las actuales soluciones para rehabilitación.

Los principales objetivos del proyecto son restaurar de la función motora en pacientes con lesión medular a través de la compensación funcional y promover el re-aprendizaje del control motor en pacientes afectados por accidente cerebro vascular y parálisis cerebral, por medio de un uso integrado de neurorobots y neuroprótesis.

El proyecto validará funcional y clínicamente el concepto de desarrollo de sistemas híbridos Humano-Robot para la rehabilitación y/o compensación funcional de trastornos motores bajo el paradigma de asistencia bajo demanda. En la visión HYPER, asumimos que el avance en las terapias de rehabilitación física depende de la obtención de una comunicación más transparente entre los sistemas humanos y las máquinas, y por lo tanto, se explorarán diferentes niveles de actividad neural humana.

El proyecto trata preguntas fundamentales en la frontera del conocimiento en diferentes disciplinas tecnológicas y científicas. Se intentará responder a estas preguntas en seis líneas de investigación (biomecánica; control neuromotor, tecnologías de control; tecnologías de sensores, actuadores y alimentación; interfaces multimodales cerebro-máquina; adaptación de sistemas híbridos a escenarios de aplicación) con interacciones horizontales:

- Los sistemas tratarán la variabilidad en las estructuras neuromusculares humanas, con adaptaciones dinámicas acordes a las capacidades motrices residuales de los usuarios.*
- La aproximación propuesta promoverá el reentrenamiento del control sensorial y motor, y la plasticidad cerebral. Esto podrá conducir a potenciales soluciones de rehabilitación de pacientes con apoplejía y parálisis cerebral, y a soluciones para la compensación funcional de pacientes con lesión medular.*

HYPER propone una interfaz multimodal cerebro-máquina, cuyo objetivo principal es explorar diferentes niveles de actividad neural, caracterizando las demandas específicas de apoyo y la participación del paciente, y así modificar la intervención a nivel periférico con los sistemas híbridos neurorobots y neuroprótesis.”

1.3. Área de uso de la investigación (enfermedades comprendidas dentro del rango del proyecto)

Ya se han nombrado varios trastornos motores debido a los daños en el sistema nervioso humano. Estos trastornos motores afectan a funciones importantes en la vida diaria: la locomoción, alcanzar objetos o andar. Es probable que el origen de estos trastornos sea a nivel central, o en las estructuras de la médula espinal del sistema nervioso. Los casos especificados antes se explican a continuación:

1.3.1. Accidente vascular cerebral (ACV)

Es un tipo de enfermedad cardiovascular. Afecta a las arterias que conducen hacia el cerebro y dentro del mismo.

Un accidente cerebrovascular sucede cuando el flujo sanguíneo de una parte del cerebro se interrumpe debido a que un vaso sanguíneo en dicho órgano se bloquea o se rompe.

Los dos tipos más importantes de ACV son: accidente cerebro vascular isquémico, en el que un vaso sanguíneo que irriga de sangre al cerebro queda bloqueado; y accidente cerebro vascular hemorrágico, que ocurre cuando un vaso sanguíneo en parte del cerebro se debilita y se rompe, provocando que la sangre se escape hacia el cerebro [2].

1.3.2. Lesión de la médula espinal (SCI)

La lesión de médula espinal o mielopatía, es una alteración de la médula espinal que puede provocar la pérdida de control voluntario de las extremidades, la locomoción deteriorada, agarre débil, sensaciones alteradas, espasmos....

Las dos principales causas de lesión medular son por: traumas por accidente de coche, caídas, disparos, rotura de disco intervertebral,...; y enfermedades como la poliomielitis, la espina bífida, tumores primarios o metastáticos, la ataxia de Friedreich, osteitis hipertrófica de la columna,...

Es importante señalar que la médula espinal no tiene que ser seccionada completamente para sufrir una pérdida de función. De hecho la mayoría de médulas espinales permanecen intactas tras una lesión de médula espinal. La lesión medular no siempre guarda relación con una lesión de espalda o de cuello como pueden ser roturas de discos, estenosis de la columna, etc. Es posible lesionarse el cuello o la espalda y que la médula espinal no sufra ningún daño.

Es una emergencia médica cuya mala evolución puede determinar un estado de parálisis permanente que dependerá del nivel al que se produzca la compresión, con mayor afectación cuanto mayor sea la cercanía al cerebro.

1.3.3. Parálisis cerebral (PC)

La parálisis cerebral es un grupo de trastornos que afecta la capacidad de una persona para moverse, mantener el equilibrio y la postura. Los trastornos aparecen durante los primeros años de vida. Por lo general, no empeoran con el tiempo. Las personas con parálisis cerebral pueden tener dificultades para caminar. También pueden tener problemas realizando tareas como escribir o usar tijeras. Algunas tienen otras afecciones médicas, como trastornos convulsivos, o discapacidad mental. No existe una cura para la parálisis cerebral, pero el tratamiento puede mejorar las vidas de quienes la sufren. El tratamiento incluye medicinas, aparatos y terapia física, ocupacional y del habla [2].

Los médicos usan el término parálisis cerebral para referirse a cualquiera de un número de trastornos neurológicos que aparecen en la infancia o en la niñez temprana y que afectan permanentemente el movimiento del cuerpo y la coordinación de los músculos pero que no evolucionan, en otras palabras, no empeoran con el tiempo. El término *cerebral* se refiere a las dos mitades o hemisferios del cerebro, en este caso al área motora de la capa externa del cerebro (llamada corteza cerebral), la parte del cerebro que dirige el movimiento muscular; *parálisis* se refiere a la pérdida o deterioro de la función motora [3].

1.4. Estado del arte

Durante el siglo pasado se ha intentado, con cierta frustración, restaurar las funciones motoras humanas. Los científicos se han sentido fascinados con la posibilidad de interconectar el sistema nervioso humano con dispositivos mecatrónicos. La restauración de estas funciones empezó con la lesión de la médula espinal, pero se puede extender a los trastornos ya mencionados antes: ACV, SCI, PC,...que se beneficiarían de los avances [4].

Los primeros robots que se utilizaron en la rehabilitación fueron robots industriales adaptados para la función. De ese modo nacieron los Wearable Robots (WRs) (Robots para llevar o robots portátiles). Se define Wearable Robots en el libro "*Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*" como aquellos robots "que pueden ser puestos" que se adaptan al cuerpo humano en su forma y función, como pueden ser segmentos y articulaciones. En el mismo libro encontramos tres tipologías básicas [5].

- Empowering robotic exoskeletons. Estos robots fueron llamados originalmente "extenders" (extensores) y fueron definidos como robots que "extendían"/ampliaban la fuerza humana. Son, a falta de una definición mejor, una extensión de las capacidades humanas.
- Robots ortopédicos. Su propósito es restaurar funciones perdidas, como puede ser la corrección de una mala condición neurológica. Estos robots son exoesqueletos.
- Robots prostéticos. Se define prótesis como un mecanismo electromecánico que sustituye miembros tras una amputación o malformación. Estos robots sustituyen directamente el miembro en cuestión.

"Los dispositivos se centran principalmente en la ampliación de los límites de la fuerza muscular humana. No es que los productos de hoy en día sean capaces de salvar al mundo como Iron Man, pero parecen estar en camino de desarrollar tecnologías que podrían ayudar a los ancianos andar de pie de nuevo y ayudar a las personas con discapacidad caminar por las calles". [6] En la imagen 2 se puede observar un exorobot de miembros inferiores generado por la Universidad de Korea.

EL siguiente paso en el campo de la rehabilitación viene de la mano de los robots Soft Robots (SRs). La diferencia básica con los modelos anteriores radica en que los actuadores no son artificiales, sino que estos son sustituidos por la estimulación eléctrica funcional (Functional Electrical Stimulation, FES) de los propios músculos.

La estimulación eléctrica funcional es una técnica que utiliza corrientes eléctricas para activar los nervios que inervan las extremidades afectadas por la parálisis como resultado de lesión de la médula espinal, traumatismo craneal, accidente cerebrovascular y otros trastornos neurológicos. FES se utiliza principalmente para restaurar la función

en las personas con discapacidad. A veces se refiere como la estimulación eléctrica neuromuscular (EENM). [7]

Es en este punto en que la frontera entre el ser humano y el robot se vuelve difusa, y se aprecia el robot como una extensión del cuerpo. Entramos en una evolución de los robots en sistemas híbridos humano-robot.



Imagen 1.2. Wearable Robot de la Universidad de Korea
Fotografía del Korea Times [6]

Es en este momento donde pueden aparecer los conceptos anteriores de Neurorobots y Neuroprótesis. Los dos intentarán obtener señales para la movilización de los actuadores a través de interfaces cerebromáquina (Brain-Machine interfaces, BMIs). Se consideran tecnologías complementarias en la restauración funcional de las funciones sensorial y motora.

Antes de proseguir con el estado del arte presente se ampliarán los párrafos anteriores desde el comienzo de la palabra “robot”. Aunque existen precedentes de mecanismos articulados complejos como el Gallo de Estrasburgo (XIV), el León mecánico de Da Vinci (XVII) o El Hombre de palo (XVI), se ha decidido optar por la definición de la RAE para nombrar a los robots:

“Un robot es una “máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes reservadas sólo a las personas”. [8]

1.4.1. Introducción a la robótica

Los antecedentes más directos de los robots fueron los telemanipuladores, herramientas de trabajo para manipular elementos radiactivos. Construidos mecánicamente hasta 1954, momento en que la transmisión pasó a ser electrónica mediante servocontrol.

Hasta este momento este tipo de máquinas necesitaban de un operario que las manejase. No obstante poco a poco se sustituyó al ser humano por un programa de ordenador que controlase los movimientos del robot.

El término robot fue acuñado por primera vez en la obra de 1920 “Robots Universales Rossum” (RUR) del escritor Karen Capek. Después de eso, la palabra fue trasladada al cine mediante el film “Metrópolis” de Thea von Harbou y Fritz Lang en el año 1926. [9]

Una de las primeras personas que utilizó la palabra robot aplicada al campo científico de construcción y programación de éstos fue el conocido Isaac Asimov. En el año 1942 enunció las leyes de la robótica clásica en la obra “Rundaround”.

1. Un robot no debe dañar a un ser humano o, por su inacción, dejar que un ser humano sufra daño.
2. Un robot debe obedecer las órdenes que le son dadas por un ser humano, excepto si estas órdenes entran en conflicto con la Primera Ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia (por ser un sistema muy costoso), hasta donde esta protección no entre en conflicto con la Primera o la Segunda Ley.

Gracias a estas leyes Isaac Asimov ha sido la persona encargada de transmitir seguridad por parte de los robots, ya que hasta entonces lo único que se conocía sobre ellos eran leyendas como Frankenstein o el Golem de Praga, relatos que hablaban de robots o seres creados por el hombre que se volvían violentos y atacaban a la población.

1.4.2. Clasificación de los robots

Se presentan a continuación una serie de clasificaciones de robots. [9]

- Clasificación por generaciones
 - o 1ª Generación: repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno
 - o 2ª Generación: adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Puede localizar, clasificar y detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos.

- 3ª Generación: su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee capacidad para la planificación automática de tareas.
- Clasificación por prestaciones (es la clasificación establecida por AFRI, la Asociación Francesa de Robótica Industrial):
 - Tipo A: manipulador con control manual o mando a distancia.
 - Tipo B: manipulador automático con ciclos preajustados, regulación mediante fines de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.
 - Tipo C: robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimiento sobre su entorno.
 - Tipo D: robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos.

Dado que los primeros robots fueron los robots industriales, y que es a partir de ligeras modificaciones de modelos anteriores que los robots han ido evolucionando y especializándose en distintos ambientes de trabajo, se explicará brevemente los robots industriales.

Las bases del robot industrial moderno fueron establecidas por G.C.Devol, quien comienza a trabajar con Engelberger (director de ingeniería de industrias aeroespaciales). Fundan la empresa Consolidated Controls Corporation, que decantó en Unimation (Universal Automation). Su primera máquina fue la Unimate, instalada en 1960. Se utilizaba en una aplicación de fundición por inyección.

La utilización del término robot a estas máquinas vino de la mano de grandes empresas como AMF, que vieron el potencial de un término que era por todos conocido. De este modo, las personas asignaban los modelos de la ciencia ficción a los robots prácticos y muy alejados de la humanidad de las fábricas.

La JIRA (Asociación de Robótica Industrial de Japón) fue la primera asociación robótica del mundo, en 1972. Un par de años más tarde se fundó el RIA (Instituto de Robótica de América al principio, y luego llamado Asociación de Industrias Robóticas).

Europa fue más lenta, formando en 1980 la Federación Internacional de Robótica en Suecia.

Los robots comienzan a sustituir al hombre de forma masiva en los puestos de trabajo debido a las siguientes ventajas:

- más rapidez y seguridad en la ejecución de las tareas

- menos costo
- gran adaptación al mercado

1.4.3. Elementos del robot industrial

El robot industrial posee una serie de elementos interconectados entre sí. Estos elementos son:

- estructura mecánica
- sistema de transmisión
- sistema de accionamiento
- sistema sensorial
- sistema de control
- elementos terminales

1.4.3.1. Estructura mecánica [10]

Un robot está formado por una serie de elementos unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos elementos consecutivos. Existen tres tipos de articulaciones: traslacionales, de giro, o mixtas.

Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar una articulación con respecto a la anterior es denominado grado de libertad. De ese modo, el número de grados de libertad del robot es igual a la suma de los grados de libertad de sus articulaciones.

Con respecto a la estructura mecánica definimos seis tipos de robot:

- Robot cartesiano

Robot cuyo brazo presenta tres articulaciones prismáticas. Posee tres movimientos lineales (tres grados de libertad), correspondientes a los ejes X , Y y Z. Los movimientos que realiza este robot entre un punto y otro son con base a interpolaciones lineales.

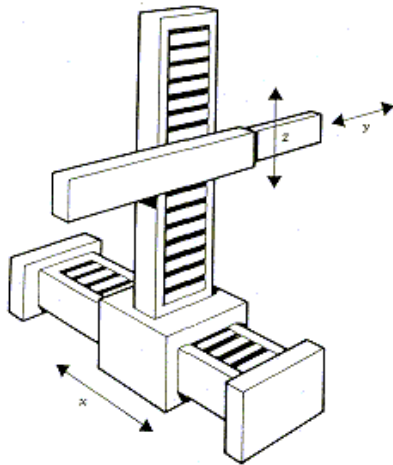
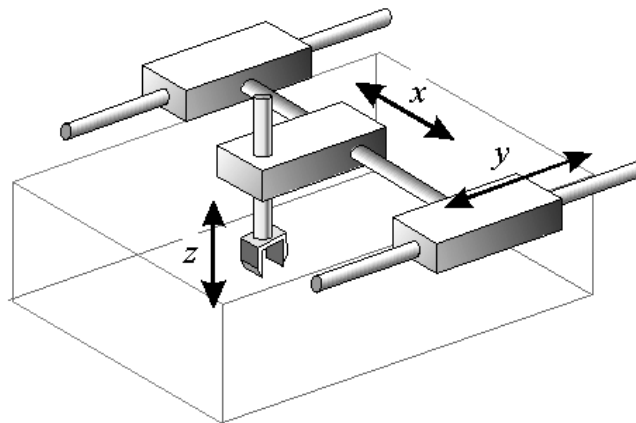


Imagen 1.3. Robot cartesiano



Rangos de movimiento

- Robot cilíndrico

Robot cuyos ejes forman un sistema de coordenadas cilíndricas. Puede realizar dos movimientos lineales y uno rotacional. Tiene por lo tanto tres grados de libertad. Este robot ejecuta los movimientos mediante interpolación lineal e interpolación por articulación.

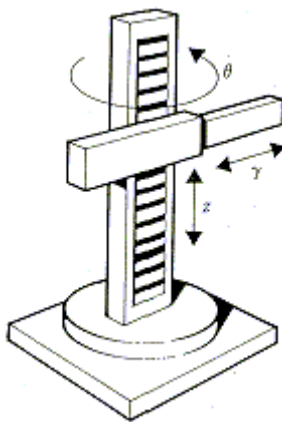
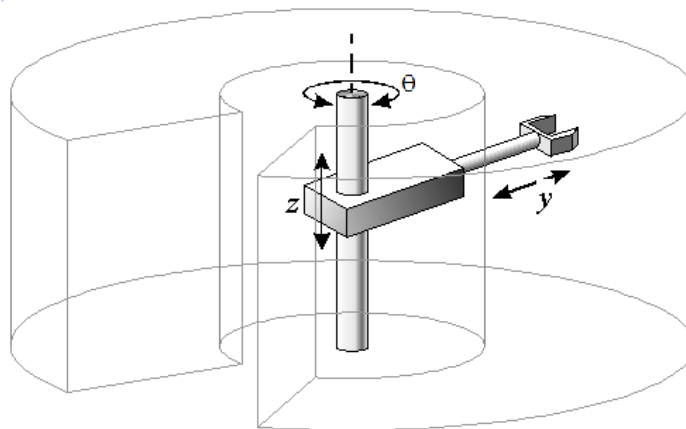


Imagen 1.4. Robot cilíndrico



Rangos de movimiento

- Robot polar o esférico

Robot cuyos ejes forman un sistema de coordenadas polares. Tiene varias articulaciones, cada una de ellas puede realizar un movimiento distinto: rotacional, angular y lineal. Este robot utiliza la interpolación por articulación para moverse en sus dos primeras articulaciones y la interpolación lineal para la extensión y retracción.

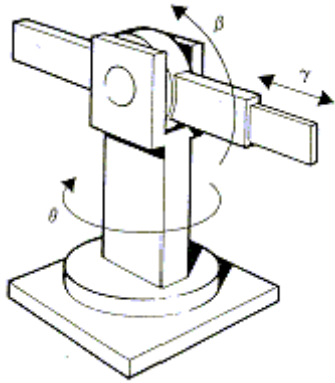
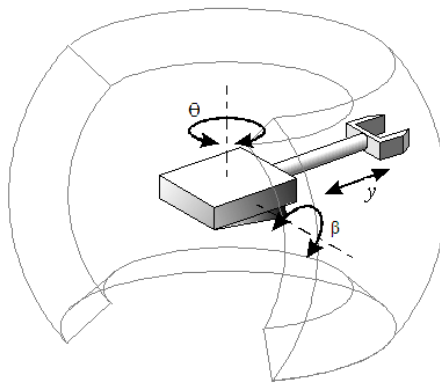


Imagen 1.5. Robot polar o esférico



Rangos de movimiento

- Robot articulado

Robot formado por un mínimo de tres ejes rotacionales. Presenta una articulación con movimiento rotacional y dos angulares. Aunque el brazo articulado puede realizar el movimiento de interpolación lineal (para lo que requiere mover simultáneamente dos o tres de sus articulaciones), el movimiento natural es el de interpolación por articulación.

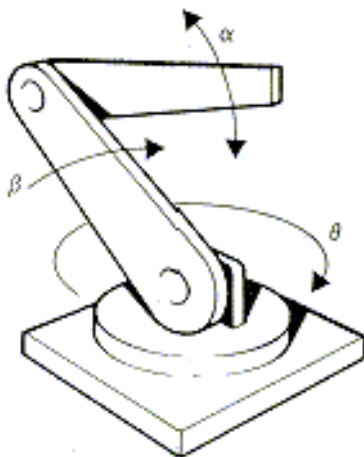
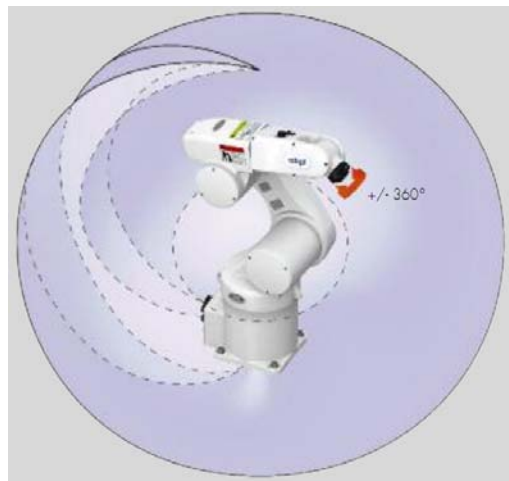


Imagen 1.6. Robot articulado



Rangos de movimiento Robot Adept Viper s650 [11]

- Robot SCARA (Selective appliance arm robot for assembly)

Robot que presenta dos ejes rotacionales paralelos y un eje lineal también paralelo a ambos, de desplazamiento vertical.

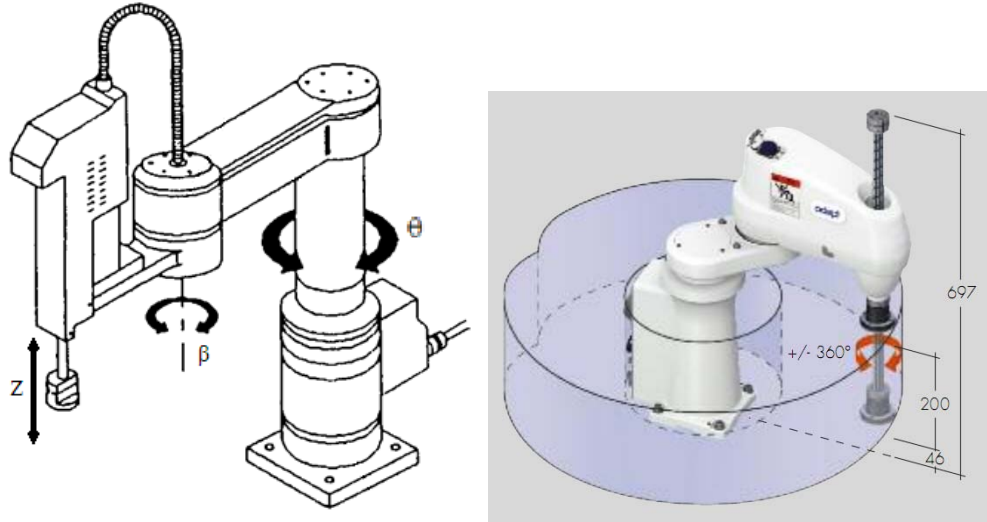


Imagen 1.7. Robot SCARA Rangos de movimiento/Robot Cobra s600 [11]

- Robot paralelo

Robot cuyos brazos presentan articulaciones prismáticas o rotaciones concurrentes.

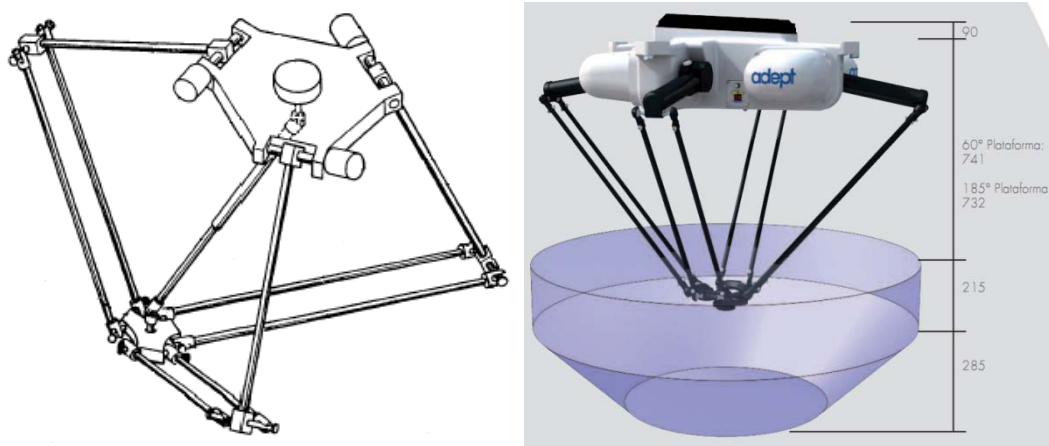


Imagen 1.8. Robot Paralelo Delta [12] Rangos de movimiento Robot Adept Quattro s650H [11]

1.4.3.2. Sistema de transmisión

Las transmisiones son los elementos encargados de trasladar el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones. Este sistema posee una serie de reductores que adaptan el par y la velocidad a la salida de los actuadores.

Las reductoras introducen una serie de efectos negativos, como son el juego angular, rozamiento o disminución de la rigidez del accionador. Esto reduce la precisión del robot.

Dado que un robot se mueve con aceleraciones grandes, se intenta reducir el momento de inercia de los extremos. Esto se logra empleando transmisiones. Se colocarán, siempre que sea posible, los actuadores lo más cerca de la base del motor. Un buen sistema de transmisión ha de tener un tamaño y peso reducidos, evitando juegos y holguras.

Las transmisiones más utilizadas en robótica son: cadenas, cables, correas y enlaces rígidos.

1.4.3.3. Actuadores [13]

Son los encargados de generar el movimiento de los elementos del robot siguiendo las órdenes dadas por la unidad de control. Se busca que la relación entre potencia y tamaño y peso sea alta. De este modo se minimiza el momento de inercia de la estructura global.

En la imagen 1.9 aparece el esquema de un sistema de control básico en el cuál se representan los componentes más importantes, como son el controlador (PLC, CPU, operario,...), los accionadores (motores), sistema a controlar, sensores. Todo ello clasificado en:

- Parte de mando: cerebro del sistema. Mediante una programación o una serie de órdenes básicas, el sistema se autoregula en función de las directrices gracias a este núcleo.
- Parte operativa: es la parte física del proceso, mediante la cual se obtiene una respuesta cuantificable, como puede ser una apertura de válvula, el desplazamiento de un pistón, etc.

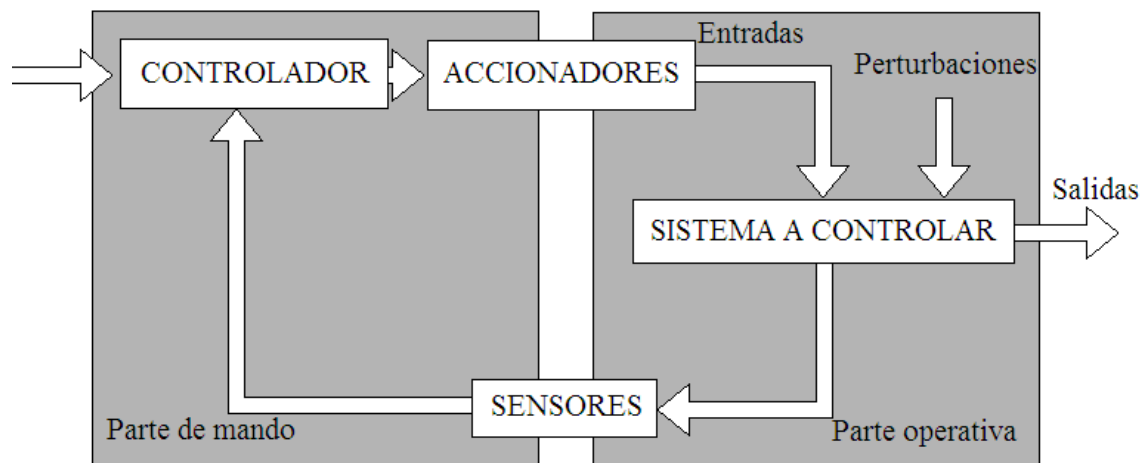


Imagen 1.9. Funcionamiento básico del sistema de control, los actuadores y las entradas y salidas del sistema

En robótica se utilizan actuadores clasificados en función de la fuente de energía: neumáticos, eléctricos e hidráulicos. A continuación se presenta una tabla resumen acerca de las características básicas que diferencian estos tres dispositivos:

	Neumáticos	Hidráulicos	Eléctricos
Ventajas	Baratos Rápidos Sencillos Robustos	Rápidos Alta relación potencia-peso Alta capacidad de carga Estabilidad frente a cargas estáticas	Precisos Fiables Fácil control Instalación sencilla
Inconvenientes	Dificultad de control Necesitan instalación auxiliar Son ruidosos	Instalación especial Mantenimiento Fugas Caros	Potencia limitada

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de actuadores.

En la siguiente tabla aparece un resumen de los tipos de actuadores en función de las fuerzas y pares:

	Actuador Neumático	Actuador eléctrico	Actuador hidráulico
Fuerza generadora del movimiento	Presión del aire	Energía eléctrica	Presión hidráulica
Elemento motriz	Émbolo, pistón o veleta	Motor eléctrico	Émbolo, pistón o veleta
Transmisión de fuerza o par	Eje o cremallera	Reductor	Eje
Conversión mecánica	Yugo o piñón	-	Yugo o piñón

Tabla 1.2. Tipos de actuadores.

La elección del tipo de actuador dependerá de los siguientes factores: coste, velocidad, controlabilidad, potencia, precisión, peso, volumen, mantenimiento y seguridad.

Actuadores eléctricos

Los actuadores eléctricos transforman la energía eléctrica en mecánica a través de un motor o servomotor que consta básicamente de dos partes: un estator fijo y un rotor móvil.

Los accionamientos eléctricos son los más usados por sus buenas características de control, sencillez y precisión. Sin embargo, en un entorno de trabajo con gases explosivos no resultarán adecuados los accionamientos eléctricos. Estos motores son los más utilizados en robots comerciales, fundamentalmente por razones de tamaño, peso, económicas y facilidad de conexión y puesta en marcha. Los accionadores eléctricos se emplean en robots que deben operar en entornos limpios, reducidos y de alta precisión.

Tipos de accionamientos eléctricos:

- Motor de corriente continua
- Motor de corriente alterna (asíncrono, jaula de ardilla)
- Motor de corriente alterna (rotor bobinado)
- Motor paso a paso
- Servomotores

Motor de corriente continua

Convierte la energía eléctrica continua en mecánica, generalmente mediante giro. Es capaz de conseguir potencias desde las fraccionarias al millar de kilowatios.

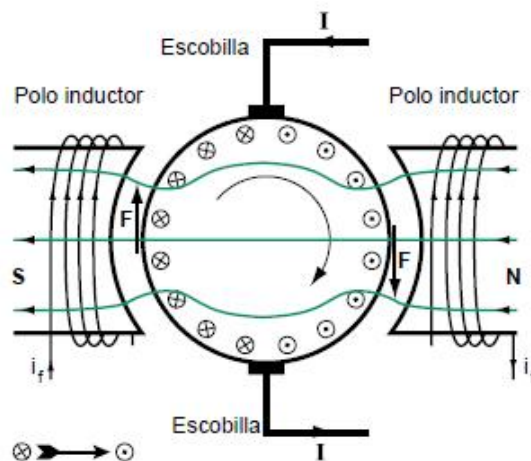


Imagen 1.10. Producción de par en un motor de corriente continua

Ventajas:

- Fácil control de posición, par y velocidad
- Posibilidad de regular la velocidad desde vacío a plena carga
- La velocidad depende de la tensión de alimentación

Inconvenientes

- Conmutación electromagnética (colector)

Motor de corriente alterna

Estos motores tienen la peculiaridad de que no precisan de un campo magnético en el rotor alimentado con corriente continua como en los casos del motor de corriente directa o del motor síncrono.

Una fuente de corriente alterna (trifásica o monofásica) alimenta al estator.

Motor de corriente alterna (asíncrono, jaula de ardilla)

Convierte la energía eléctrica en mecánica, generalmente mediante giro. Su velocidad viene determinada por la frecuencia de la tensión de la red eléctrica a la que esté conectado y por el número de pares de polos del motor.

El rotor consta de un cierto número de barras de cobre o de aluminio, conectadas eléctricamente por anillos de aluminio finales.

Ventajas:

- Precio bajo
- Robustez

Desventajas

- Para controlar posición y velocidad es necesario un variador electrónico

Motor de corriente alterna (asíncrono, rotor bobinado)

El motor de rotor bobinado tiene un rotor constituido, en vez de por una jaula, por una serie de conductores bobinados sobre él en una serie de ranuras situadas sobre su superficie. De esta forma se tiene un bobinado en el interior del campo magnético del estator, del mismo número de polos (ha de ser construido con mucho cuidado), y en movimiento. Este rotor es mucho más complicado de fabricar y mantener que el de jaula de ardilla, pero permite el acceso al mismo desde el exterior a través de unos anillos que son los que cortocircuitan los bobinados. Esto tiene ventajas, como la posibilidad de utilizar un reostato de arranque que permite modificar la velocidad y el par de arranque, así como el reducir la corriente de arranque.

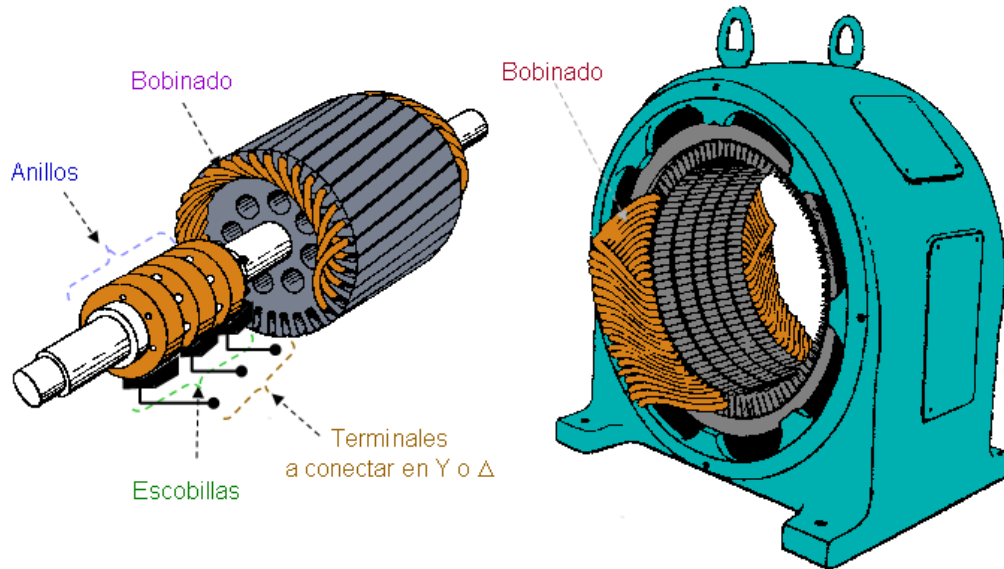


Imagen 1.11. Motor de corriente alterna asíncrono

Motor paso a paso

El motor PaP es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa es que es capaz de avanzar una serie de grados (paso) dependiendo de sus entradas de control. El motor paso a paso se comporta de la misma manera que un convertidor digital-analógico y puede ser gobernado por impulsos procedentes de sistemas lógicos.

Este motor presenta las ventajas de tener alta precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento.

Servomotores

Un servomotor (también llamado servo) es un dispositivo similar a un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición.

Está conformado por un motor, una caja reductora y un circuito de control. Los servos se utilizan frecuentemente en sistemas de radio control y en robótica, pero su uso no está limitado a estos.

Es posible modificar un servomotor para obtener un motor de corriente continua que, si bien ya no tiene la capacidad de control del servo, conserva la fuerza, velocidad y baja inercia que caracteriza a estos dispositivos.

Actuadores neumáticos

Transforman la presión de un fluido en movimiento mecánico. Tradicionalmente se ha utilizado el aire debido a una serie de ventajas: es abundante y barato, es fácil de transformar y almacenar, es limpio y no arde.

Los inconvenientes principales de estos actuadores son: el ser difícil controlarlos en posición y que las fuerzas o pares que consiguen no son muy elevados.

El aire realiza el siguiente ciclo al ser utilizado en este sistema:

- Atmósfera.
- Compresor: se aumenta la presión ligeramente por encima de la presión de trabajo.
- Acondicionador: tras el compresor el aire sale sucio, a alta temperatura y con exceso de humedad. En este paso se limpia y filtra el aire.
- Almacenamiento y distribución: se almacena en depósitos a alta presión para su posterior distribución. Asegura un caudal constante y sin picos.
- Válvulas
- Actuadores

En los sistemas neumáticos no se consigue una buena precisión de posicionamiento debido a la compresibilidad del aire. No obstante, su uso es adecuado en aplicaciones en las que baste un posicionamiento entre dos situaciones dadas (como apertura y cierre de pinzas). Hay que tener en cuenta que se necesita una instalación auxiliar de aire comprimido.

Actuadores hidráulicos

Transforma la presión de un fluido en movimiento mecánico. Habitualmente el fluido es aceite.

Los accionamientos hidráulicos permiten un control continuo dada la baja compresibilidad del aceite. Otra ventaja es la elevada capacidad de carga. El principal inconveniente es la compleja instalación necesaria ya que trabaja a altas presiones, de entre 50 y 100 bares; necesita equipos de filtrado de partículas, eliminación de aire y sistema de refrigeración.

1.4.3.4. Sensores

Para que un robot realice su tarea con la precisión y la velocidad requeridas, debe tener “conocimiento” de su estado y del estado del entorno. Los sensores internos son los elementos encargados de proporcionar la unidad de control de información sobre el estado del robot, fundamentalmente posición y velocidad de las articulaciones. El sistema de control procesa la información y actúa en consecuencia.

Los sensores de posición empleados con más frecuencia son los encoders y los resolvers.

Encoders: son sensores ópticos basados en la interrupción de un laser perpendicular al eje de giro de la articulación. Solidario al eje de desplazamiento se haya situada una rueda dentada que interrumpe el laser, convirtiéndolo de cara a los fotoreceptores en un pulso de luz en función de la velocidad angular del eje.

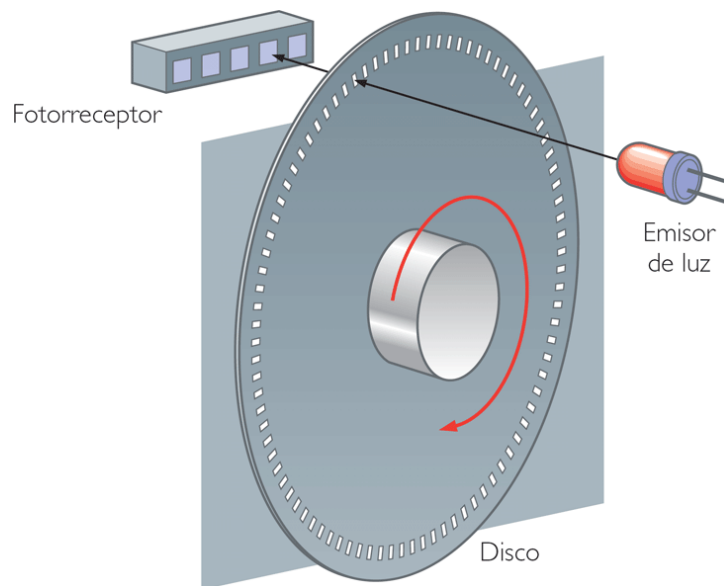


Imagen 1.12. Representación del funcionamiento básico del encoder

Resolvers: son captadores analógicos de resolución teóricamente infinita, que por supuesto viene dada en función de la electrónica asociada. El funcionamiento de los resolvers se basa en la utilización de una bobina solidaria al eje excitada por una portadora (de unos 400 Hz) y por dos bobinas fijas a su alrededor. El giro de la bobina móvil hace que el acoplamiento con las bobinas fijas varíe, con lo que se consigue que la señal resultante en éstas dependa del seno del ángulo de giro. Midiendo esta señal se puede calcular el ángulo girado por la bobina.

1.4.3.5. Unidad de control

Su misión consiste en procesar los datos recibidos de los sensores y las órdenes dadas por el operario y transmitir a los actuadores las señales necesarias para realizar la tarea programada.

Todos estos elementos nombrados actúan básicamente de la siguiente manera:

- a) Fase de percepción del entorno. El robot dispone de sensores para conocer lo que ocurre en su entorno. Cada sensor detecta una magnitud física variable: temperatura, excesiva humedad en un terreno, un obstáculo en medio de una trayectoria, etc., y la convierte en una señal eléctrica. El conjunto de señales generadas por los sensores forman los datos de entrada al sistema.
- b) Procesado e interpretación de los datos. El elemento central del robot es la unidad de control. Este sistema consta generalmente de un microprocesador y de un programa específico para el tratamiento de dichos datos. Los datos digitales procedentes de los sensores son leídos e interpretados por el microprocesador, y este activa las señales de control correspondientes para ejecutar una acción.

- c) Ejecución de la acción. Se denomina acción a la ejecución física de un cambio en el robot, ya sea un movimiento de una articulación, un cambio de posición, una parada, etc. Estas tareas son realizadas por dispositivos motrices, como motores eléctricos, cilindros neumáticos o hidráulicos, accionados eléctricamente.

1.4.4. Neurorobots

Los neurorobots son aquellos dispositivos robóticos cuyo sistema de control está basado en el sistema nervioso humano. Estos modelos funcionan con la premisa de que cuerpo y cerebro están en el medio ambiente y en un entorno real. Esto último es necesario por dos razones. En primer lugar, simulando un entorno se puede introducir sesgos no deseados y no intencionales en el modelo. En segundo lugar, los entornos reales son ricos, multimodales y ruidosos, lo que es difícil de computar y simular. No obstante, todas estas características interesantes vienen por “libre” cuando un neurorobot se coloca en el mundo real, es decir, que no son controlados por el neurorobot (agentes externos).

El campo de los neurorobots comenzó a finales de 1980. El Doctor Mitsuo Kawato y sus colegas construyeron una serie de dispositivos robóticos para probar cómo se adapta a los movimientos el cerebelo. Se trata de un modelo del cerebelo (retroalimentación-error-aprendizaje) mediante el cual es capaz de adquirir los modelos internos de los aparatos de motor a través del aprendizaje motor[14]. El grupo de Gerald Edelman puso a prueba la Teoría de selección de grupos neuronales mediante la introducción de la serie de Darwin a los autómatas. [15]

Un neurorobot tiene las siguientes propiedades:

- Se ajusta a una tarea determinada.
- Está situado en un entorno real.
- Tiene un medio para detectar las señales ambientales y actuar sobre su entorno.
- Su comportamiento es controlado por un sistema nervioso que simula, dentro de un determinado rango, el cerebro, en cuanto a arquitectura y dinámica.

Como resultado de estas propiedades, los modelos de neurorobots proporcionan una heurística para desarrollar y probar las teorías de la función cerebral en el contexto de las interacciones fenotípicas y ambientales. Además, los modelos neurorobóticos podrán servir de base para el desarrollo de robots más eficaces, basados en una mejor comprensión de las bases biológicas de la conducta adaptativa.

Los neurorobots se pueden dividir grosso modo en tres tipos: de control del motor y la locomoción; del aprendizaje y el sistema de memoria; y de sistemas de valores y selección de acciones.

1.4.5. Neuroprótesis

Las neuroprótesis son una serie de dispositivos que sustituyen una función cognitiva o una modalidad sensorial que podría haber sufrido daños como consecuencia de una lesión o una enfermedad.

Son circuitos electrónicos que realizan la función de las células nerviosas dañadas. Son capaces de generar y registrar señales neurales y, por lo tanto, pueden estimular músculos y recibir señales procedentes, en último lugar, de los órganos de los sentidos. [16]

Una neuroprótesis está constituida por:

- Electrodo. Actúan como interfase entre el miembro y la circuitería electrónica. Por lo tanto, permiten registrar la señal neural y estimular el nervio.
- Estimulador. Es la circuitería encargada de la generación de la propia señal de estimulación.
- Sistema de registro neural. Se encarga de procesar y registrar la señal proveniente del nervio.
- Circuitería de realimentación entre el estimulador y la circuitería de registro.
- Permite, en función de la señal registrada, adecuar el estímulo.
- Controlador externo y enlace transcutáneo.

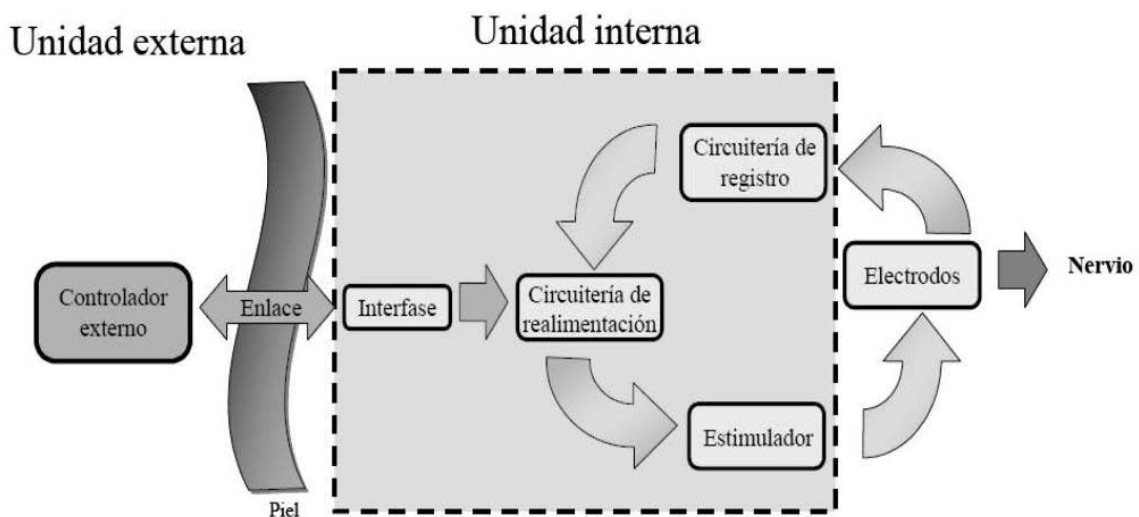


Imagen 1.13. Esquema simplificado de una neuroprótesis

El desarrollo de estos dispositivos ha tenido un profundo impacto en la calidad de vida humana, y la investigación en este campo tiene la intención de resolver discapacidad.

Hay muchos retos que se deben superar para desarrollar estos dispositivos. Cualquier dispositivo implantado tiene que ser muy pequeño para ser mínimamente invasivo, especialmente en el cerebro, los ojos o la cóclea. Además, este implante tendría que comunicarse con el mundo exterior de forma inalámbrica. Esta comunicación bidireccional inalámbrica requiere un gran ancho de banda para la transmisión de datos en tiempo real, lo que es un gran desafío teniendo en cuenta que este enlace de datos tiene que operar a través de la piel. El tamaño mínimo del implante significa que se puede introducir una batería minúscula, pero la tecnología actual no es capaz de generar una batería de estas características. Por lo tanto, el implante funcionaría con la transmisión de energía inalámbrica a través de la piel. Esto es tan difícil como la transmisión de datos.

El tejido que rodea el implante suele ser muy sensible a la subida de la temperatura, por lo que el implante debe tener muy bajo consumo de energía con el fin de asegurar que no dañará el tejido. Otra cuestión muy importante es la biocompatibilidad del material con que los implantes están recubiertos. Cuanto más biocompatibles son estos materiales, menor será la reacción de los tejidos.

Aunque hay muchos tipos de neuroprótesis aquí sólo se mencionarán las neuroprótesis motoras para el control consciente del movimiento. La información que viene a continuación es acerca de este tipo.

Para capturar las señales eléctricas del cerebro, los científicos han desarrollado matrices de microelectrodos más pequeñas que un centímetro cuadrado que se pueden implantar en el cráneo para registrar la actividad eléctrica y realizar la transducción de la información registrada a través de un cable delgado. Después de décadas de investigación en simios, los neurocientíficos han sido capaces de decodificar las señales neuronales en movimientos. Los investigadores han construido interfaces que permiten a los pacientes mover cursores de ordenador, y se están empezando a construir las extremidades robóticas y exoesqueletos que los pacientes pueden controlar con pensar en el movimiento.

La tecnología detrás de neuroprótesis motoras está todavía en su infancia. Los investigadores y los participantes en el estudio siguen experimentando con diferentes formas de utilizar la neuroprótesis. Que un paciente piense en apretar el puño, por ejemplo, produce un resultado diferente a que piense en tocar con un dedo. Los filtros utilizados en las prótesis también están en proceso de perfeccionamiento, y en el futuro, los médicos esperan crear un implante capaz de transmitir señales desde el interior del cráneo de forma inalámbrica, y no a través de un cable.

Los ensayos clínicos preliminares sugieren que los dispositivos son seguros y que tienen el potencial de ser eficaces. Algunos pacientes que han usado los dispositivos durante

más de dos años no han sufrido ningún síntoma adverso, o de haberlo sufrido no ha sido grave.

1.4.6. Trabajo conjunto de neurorobots y neuroprótesis [4]

Los neurorobots transforman las señales del cerebro para controlar el robot de rehabilitación (normalmente un exoesqueleto). Mientras tanto, las neuroprótesis se focalizan en restaurar de modo artificial el control de los músculos mediante la estimulación eléctrica (FES). Aunque ambos sistemas se compenetran bastante bien, aparecen problemas con las neuroprótesis:

- FES es un tratamiento incómodo, que no tiene en cuenta movimientos naturales;
- FES no es demasiado selectivo, debido principalmente a los modelos musculares incompletos;
- los reflejos, así como cualquier función motora no voluntaria son difíciles de implementar al modelo.

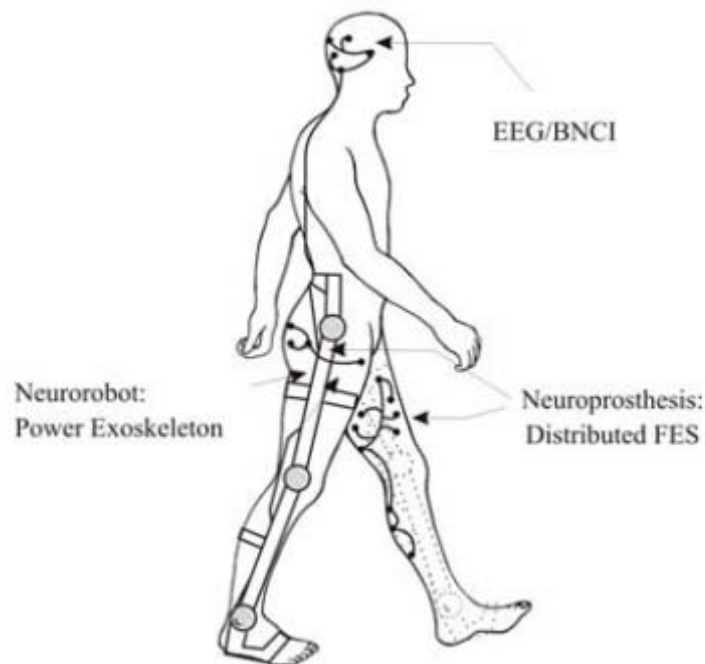


Imagen 1.14. Esquema básico de la integración de neurorobots, neuroprótesis y sistema BMI

Por supuesto, estos inconvenientes se ven superados por las ventajas:

- el sistema tiene una cinemática muy precisa;
- el control de la arquitectura (como el generador central de pautas) así como modelos internos retroalimentados y los reflejos, pueden ser implementados;
- el modelo artificial puede tener en cuenta variables involuntarias como el control de la estabilidad.

Por supuesto, toda interacción debe ser pensada cuidadosamente en términos de una cinemática compatible, así como el hecho de que las fuerzas aplicadas por los actuadores sean controladas. En estos campos, nos encontramos con limitaciones basadas en las tecnologías disponibles, como accionamientos eficientes. La aplicación de los neurorobots y neuroprótesis se basa en una serie de tecnologías: BMIs, FES, control, actuadores y sensores. En la actualidad la barrera se encuentra en la implementación de ambas soluciones juntas.

En cuanto a las BMI's, las tendencias actuales conducen a la integración de la actividad cerebral (electroencefalografía, EEG y otras fuentes invasivas y no invasivas), la actividad neuronal (ESP), la actividad neuromuscular (EMG) y el movimiento de las extremidades para las interfaces robustas (Pons 2008). Por razones obvias, el control de neurorobots y neuroprótesis cuenta con la tecnología como factor limitante, más aún tratándose de técnicas no invasivas.

En general, los factores limitantes para la aplicación de las estrategias de FES son:

- dolor y sensaciones incómodas;
- la fatiga muscular;
- las respuestas de los músculos que conduce a las variaciones y movimientos bruscos del miembro (como contracciones);
- la falta de hardware y de modelos musculo-esqueléticos.

Otras limitaciones tecnológicas para la aplicación eficiente de los neurorobots están relacionadas con los sensores, actuadores y las tecnologías de almacenamiento de energía.

1.5. Objetivos del proyecto HYPER

El objetivo del proyecto HYPER se subdivide en dos: [4]

- restaurar la función motora en pacientes con SCI a través de la compensación funcional y;
- promover el re-aprendizaje del control motor en los pacientes con ACV y el PC por medio de un uso integrado de neurorobots y neuroprótesis.

1.6. Temas de investigación

Por supuesto, el proyecto HYPER se construye sobre las respuestas a una serie de preguntas que amplían los márgenes del conocimiento, y que aquí sólo se plasmarán de manera muy breve: [4]

1.6.1. Biomecánica

- Q1. ¿Cómo controlar selectivamente los músculos con la estimulación de la superficie?
- Q2. ¿Es posible activar la parte superior / inferior músculos de las extremidades mediante la estimulación de las neuronas motoras o mediante la activación de los reflejos a través de la estimulación de los nervios sensibles?
- Q3. ¿Cuáles son los requisitos para evitar causar dolor o molestias durante la estimulación eléctrica muscular?
- Q4. ¿Cuáles son las condiciones que dan lugar a fatiga muscular tras la aplicación de las estrategias de la FES? ¿Cómo detectar tales condiciones?
- Q5. ¿Cómo garantizar la compatibilidad cinemática entre ambas estructuras?
- P6. ¿Cuál es la definición correcta biomecánica del sistema de fuerzas aplicadas?
- Q7. ¿Cómo garantizar la ergonomía y usabilidad de los sistemas?

1.6.2. Control neuromotor

- Q1. ¿Cómo planifica nuestro sistema nervioso, cómo codifica o controla el movimiento?
- Q2. ¿Qué bloques funcionales están involucrados en el control neural del movimiento?
- Q3. ¿Es sensato para traducir estos bloques funcionales en controladores artificiales NR / NP?
- Q4. ¿Cómo pueden esos principios de motor de control biológico utilizarse para controlar el NP y los dispositivos de NR?
- Q5. ¿Pueden estos modelos de ingeniería utilizarse para preguntar sobre las causas o los efectos de las enfermedades?

1.6.2. Tecnologías de control

- Q1. ¿Cuáles son las fuentes de inestabilidad en los sistemas acoplados entre humanos y robots en la forma propuesta en HYPER?
- Q2. ¿Cómo evaluar la estabilidad dinámica del sistema híbrido completo?
- Q3. ¿Cómo reproducir esos modelos (o dibujos) de movimiento generados centralmente observados en humanos sanos con los sistemas híbridos?
- Q4. ¿Cómo puede el NR y NP en conjunto proporcionar un comportamiento adaptable con apoyo variable para cada usuario en particular?
- Q5. ¿Cómo aplicar ajustes subconscientes y mecanismos de control de motores con los sistemas híbridos?
- Q6. ¿Cómo incorporar la flexibilidad de control voluntario del híbrido NP-NR en los sistemas?

1.6.3. Actuador, sensor y las tecnologías de alimentación

- Q1. ¿Cuáles son los requisitos de las aplicaciones para los sistemas de accionamiento eficiente y seguro en NR?
- Q2. ¿Son las emergentes tecnologías de actuadores una apropiada solución en el contexto de NR?

Q3. ¿Cuáles son las limitaciones de hardware (y cómo superarlas) para la aplicación selectiva de la FES?

Q4. ¿Cuál es la información (y las tecnologías de sensor correspondiente) necesarios para poner en práctica todas las estrategias de contro?

Q5. ¿Cuál es la información (y las tecnologías de sensor correspondiente) para evaluar la comodidad durante el uso del sistema de la NR-NP?

Q6. ¿Cuáles son las tecnologías que aseguren que las soluciones HYPER serán energéticamente eficientes?

1.6.4. Multimodal Interfaces Cerebro Máquina (MBMI)

Q1. ¿Cómo mejorar las tecnologías actuales de registro del EEG para que sean portátiles?

Q2. ¿Cómo vincular el NR y estrategias de control de NP, en los ejercicios de orientación específica, con la planificación cortical y / o la ejecución de músculo?

Q3. Vinculación de determinados estados mentales con el sistema híbrido que permitiría la generación de los comandos que en pacientes sanos se producen de una manera consciente.

Q4. Movimientos involuntarios se encuentran con frecuencia en los grupos de pacientes involucrados en el proyecto HYPER, por ejemplo, movimientos espásticos o involuntarios.

Q5. ¿Qué se requiere para caracterizar el grado de actividad del paciente y cómo es esto importante para el enfoque de ayudar cuando sea necesario?

1.6.5. Adaptación de la PN y NR a los usuarios y los escenarios de aplicación

Q1. ¿Quiénes son los grupos de usuarios?

Q2. ¿Cuáles son las necesidades de los usuarios?

Q3. ¿Son las escalas actuales y las normas adecuadas para evaluar la terapia y la usabilidad?

Q4. ¿Cómo involucrar a los usuarios en el desarrollo?

Q5. ¿Cómo vamos a validar el sistema?

Q6. ¿Cómo la tecnología puede mejorar la participación de los usuarios y la participación en todos los niveles en HYPER?

1.7. Organismos implicados en el Proyecto Hyper

Para cerrar este apartado, se hace mención a continuación de los diferentes organismos implicados en el proyecto: [4]

- Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Grupo de Bioingeniería
- El Instituto de Bioingeniería de Catalunya (IBEC)
- Universidad de Zaragoza (UNIZAR), Grupo de Robótica
- Universidad Carlos III de Madrid (UC3M), Laboratorio de Robótica del Grupo de Investigación del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
- CIDETEC (Centro de Electroquímica Technologies), Departamento de Nuevos Materiales y el Departamento de Energía

- Unidad de vida de Fatronik-Tecnia, Departamento Biorrobótica en la Salud y Calidad
- VICOMTech (Comunicación Visual y Tecnologías de Interacción Centro)
- Hospital Nacional de Lesiones de la Médula Espinal, Departamento de Biomecánica y el Departamento de Ayudas Técnicas
- Facultad de Ciencias de la Salud, de la Universidad "Rey Juan Carlos", Laboratorio de Análisis del Movimiento, Biomecánica, Ergonomía, de control de motores (LAMBECOM)



CAPÍTULO II. OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1. Objetivos Proyecto Fin de Carrera

El objetivo principal de este proyecto fin de carrera es el cálculo de los actuadores necesarios para la construcción de un exoesqueleto para la rehabilitación de funciones motoras.

El proyecto se enfoca a la articulación del codo, entendida como la capacidad de adoptar determinadas posiciones, así como de los mecanismos necesarios para ellas.

En este proyecto no se tendrá en cuenta la programación necesaria para la movilidad del brazo, aunque se programarán de un modo muy básico los movimientos necesarios para algunas de las actividades necesarias para el exobrazo.

Pasos básicos a seguir:

- Introducción a la biomecánica del brazo;
- Diseño en ADAMS de un exoesqueleto viable;
- Cálculo del par motor necesario para los actuadores;
- Posibles actuadores comerciales;

El proyecto, terminado y un tanto iterativo, ha seguido los siguientes pasos generales para su desarrollo.

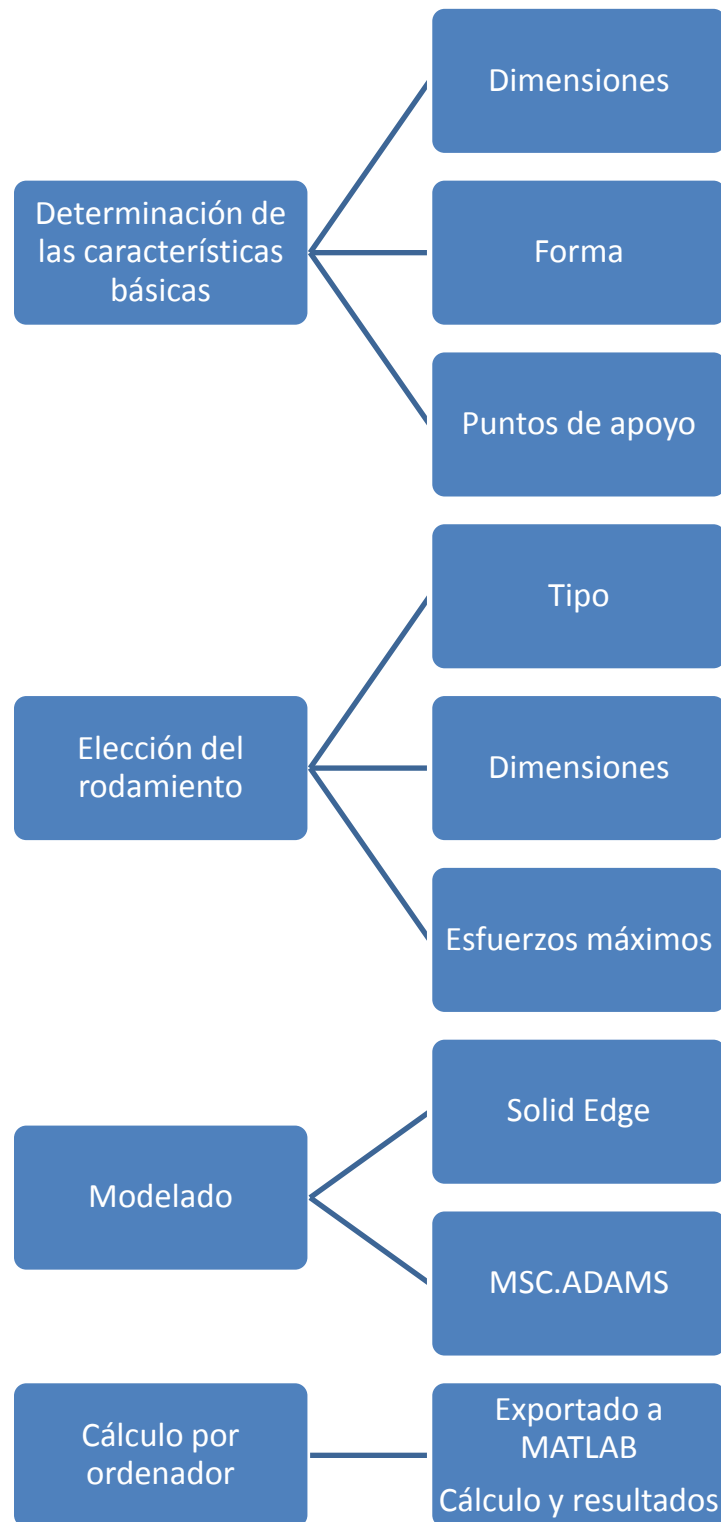


Imagen 2.1. Esquema básico del procedimiento seguido.

Al tratarse de un proceso iterativo vertical, varios de los pasos seguidos han hecho replantear opciones tomadas en un inicio y sustituirlas por configuraciones más optimizadas para el modelo.

El modelo final es el décimo, después de una serie de mejoras.

2.2. Intervenciones afectadas por el Proyecto Fin de Carrera

Dentro del proyecto HYPER se han establecido una serie de requisitos para cada una de las etapas de la rehabilitación del paciente, llamadas intervenciones.

Una vez construido, el sistema resultante constará de los siguientes componentes:

Sistema de intervención y actuación:

- Neurorobots
- Neuroprótesis
- RV – Sistema de realidad virtual. La estación de realidad virtual debe ser capaz de operar de forma síncrona con los dispositivos NR y NP (si están presentes), además de poder representar gráficamente las condiciones y comandos enviados por el paciente basándose en los datos obtenidos del sistema de monitorización y diagnóstico.

Sistema de monitorización y diagnóstico, que se empleará para controlar y monitorizar el funcionamiento del sistema NR y NP. Este sistema estará compuesto por:

- Conjunto de sensores. El conjunto de sensores debe ser capaz de almacenar todas las señales de control para las distintas estrategias de compensación activa descritas a continuación. Además, este sistema debe almacenar los datos necesarios para las aplicaciones de realidad virtual y de diagnóstico. Se identifican 4 tipologías de medida:
 - o EMG: medida de la actividad eléctrica muscular;
 - o BCI: medida de la actividad eléctrica cerebral;
 - o Cinemática: medida de la posición, velocidad y aceleración de las articulaciones y segmentos corporales y robóticos;
 - o Dinámica: medida de fuerzas de interacción entre robot y usuario, y entre usuario y entorno.
- Unidad central. La unidad central debe ser capaz de:
 - o Transmitir y recibir datos de la unidad ambulatoria;
 - o Realizar las funciones establecidas en el proyecto;
 - o La unidad base debe ser operada por el médico y nunca por el paciente.
- Unidad ambulatoria. La unidad ambulatoria debe ser capaz de:
 - o Grabar y preprocesar las señales de los sensores;
 - o Generar las señales de control en tiempo real;
 - o Almacenar datos necesarios para el análisis posterior en la función de compensación funcional fuera del hospital;
 - o Transmitir y recibir datos en tiempo real y en offline desde la unidad base
 - o Realizar las funciones establecidas en el proyecto.

Los sistemas descritos se dispondrán en conjuntos de subsistemas de dispositivos para cada una de las intervenciones previstas:

- Intervención 0: programación neuromotora
- Intervención 1: control del tronco
- Intervención 2: movilización analítica. Un solo grado de libertad
- Intervención 3: movilización combinada. Múltiples grados de libertad
 - Intervención 3.1: alcance
 - Intervención 3.2: agarre y suelta
 - Intervención 3.3: transporte proximal
 - Intervención 3.4: transporte distal
 - Intervención 3.5: retorno a la posición inicial
- Intervención 4: tareas individualizadas de la vida diaria
 - Intervención 4.1: comer
 - Intervención 4.2: beber
 - Intervención 4.3: limpiarse con la servilleta
 - Intervención 4.4: lavar la cara con la esponja
 - Intervención 4.5: peinarse
 - Intervención 4.6: lavar las manos
- Intervención 5: compensación funcional de AVD (a definir en estudios futuros)

Las intervenciones relacionadas con este Proyecto Fin de Carrera son las siguientes. Todas ellas referidas únicamente a los miembros superiores del cuerpo.

- **Intervención 2: Movilización analítica.**

- NR:
 - Codo: flexión (0° a 150°), extensión 0°, pronación (0° a 90°), supinación (0° a 80°)
- NP:
 - Codo: flexión del bíceps y supinador largo (0° a 150°), extensión del bíceps 0°, pronación (0° a 80°), supinación del bíceps (0° a 80°)
- RV: servirá para proporcionar información visual sobre el grado de actuación del paciente y proporcionar tareas visuales

- **Intervención 3.1: Movilización combinada**

- NR:
 - Codo: flexión (46/95°); extensión 0°; pronación 2/51°
- NP:
 - Codo: flexión bíceps, extensión bíceps
- RV: servirá para proporcionar información visual sobre el grado de actuación del paciente

- **Intervención 3.3: Transporte proximal**

- NR:
 - Codo: flexión (44/127°), pronación (10/49°), supinación de antebrazo 0°
 - NP:
 - Codo: extensión tríceps, supinación de antebrazo, flexión del bíceps y del supinador largo
 - RV: servirá para proporcionar información visual sobre el grado de actuación del paciente y proporcionar tareas visuales
- **Intervención 3.4: Transporte distal**
- NR:
 - Codo: extensión (0-110°), flexión (44-127°), pronación (10/49°)
 - NP:
 - Codo: extensión bíceps (0-110°), flexión bíceps, pronación de antebrazo (0-80°)
 - RV: servirá para proporcionar información visual sobre el grado de actuación del paciente y proporcionar tareas visuales
- **Intervención 3.5: Retorno a la posición inicial**
- NR:
 - Codo: flexión (44/98°), pronación (5/56°)
 - NP:
 - Codo: posición de reposo conseguida con el NR, no necesaria FES; flexión bíceps; extensión tríceps
 - RV: servirá para proporcionar información visual sobre el grado de actuación del paciente y proporcionar tareas visuales
- **Intervención 4.2: Beber**
- NR:
 - Codo: flexión (99/129°), pronación (32/52°)
 - NP:
 - Codo: flexión bíceps, extensión tríceps
- **Intervención 4.3: Limpiarse con la servilleta**
- NR:
 - Codo: prono-supinación de antebrazo repetida
 - NP:
 - Codo: flexión bíceps, extensión tríceps
- **Intervención 4.4: Lavar la cara con esponja**
- NR:
 - Codo: prono-supinación de antebrazo
 - NP:

- Codo: flexión bíceps, extensión tríceps
- **Intervención 4.5: Peinarse**
 - NR:
 - Codo: flexión-extensión
 - NP:
 - Codo: flexión bíceps, extensión tríceps



CAPÍTULO III. BIOMECÁNICA DEL BRAZO

3.1. Introducción a la biomecánica

Para la introducción a la rama de la biomecánica se va a hacer mención a una serie de elementos del sistema de movilidad del cuerpo humano.

3.1.1. Articulaciones

Una articulación es la unión entre dos o más huesos próximos. La parte de la anatomía que se encarga del estudio de las articulaciones es la artrología. Las funciones más importantes de las articulaciones son de constituir puntos de unión del esqueleto y producir movimientos mecánicos, proporcionándole elasticidad y plasticidad al cuerpo. Existen varios tipos de articulaciones:

- Articulaciones fibrosas

En ellas los componentes rígidos del esqueleto que la forman se unen por tejido conjuntivo fibroso y se caracterizan por mantener una unión continua entre los elementos que se enlazan, careciendo de movimiento.

Entre las articulaciones fibrosas se distinguen tres variedades, de acuerdo a la manera en que se dispone el tejido fibroso de unión.

Sindesmosis - Se caracteriza por una notable presencia de tejido conectivo como medio de unión articular presentándose en dos tipos fundamentales por membrana o por ligamentos

Sutura - Están constituidas por varias láminas muy delgadas de tejido conectivo y sólo se presentan en las uniones de los huesos de la cabeza.

Gónfosis - Es la tercera variedad de articulación fibrosa formada por una superficie que penetra en una cavidad ósea: Articulación dentoalveolar.

- Articulaciones Cartilaginosas

En estas articulaciones el medio de unión es tejido cartilaginoso que hacen de de la misma una articulación continua carente de movilidad.

Según el tipo de cartílago estas uniones pueden ser de dos variedades: sincondrosis y sínfisis.

- Articulaciones sinoviales

El término sinovia se refiere a ciertos líquidos corporales; actualmente se limita a designar el existente en ciertas articulaciones que en correspondencia son llamadas sinoviales.

Clasificación de las articulaciones sinoviales:

Atendiendo al número de caras articulares: simples y compuestas. Además pueden ser complejas y combinadas.

Si se tiene en cuenta la unidad dialéctica entre forma y función, la forma de las caras articulares determina las capacidades funcionales de las articulaciones.

Clasificación según forma y función:

Forma de las caras	Características	Ejes
Trocloidea	Sección de cilindro	Monoaxiales
Gínglimo	Polea o tróclea	
Elipsoidea	Aspecto elíptico	Biaxiales
Condilar	Doble elipse	
En silla	En silla de montar	
Esferoidal	Sección de esfera	Poliaxiales
Plana	Superficie aplanada	

Tabla 3.1. Clasificación de las articulaciones.

3.1.2. Músculos

Un músculo es un tejido contráctil que forma parte del cuerpo humano y de otros animales. Está conformado por tejido muscular. Los músculos se relacionan con el esqueleto o bien forman parte de la estructura de diversos órganos y aparatos.

Existen dos tipos de músculo:

- Músculo liso

Los músculos lisos forman las paredes de las vísceras y no están bajo el control de la voluntad. Sus fibras no contienen estrías.

Este músculo tiene una similitud con el músculo estriado o esquelético. La diferencia es que no posee línea Z como lo posee el músculo estriado, sino que posee bolas densas que reemplazan a estas líneas Z.

- Músculo cardíaco

Es de naturaleza estriada modificada y de control involuntario. Está presente solo en el corazón.

3.2. Datos antropomórficos

Como se ha visto en un apartado anterior, todavía hay que responder a algunas preguntas antes de saber si es posible adaptar un exoesqueleto a los movimientos exactos del ser humano.

Para analizar el brazo humano se estudia desde dos ángulos diferentes:

3.2.1. Grados de libertad

El miembro superior del cuerpo humano, el brazo, tiene un total de 7 GDL hasta llegar a la muñeca [17]. Tres de ellos se sitúan en el hombro, otro más en el codo y tres más en la muñeca. Los tipos de movimientos asociados a estos grados de libertad aparecen en detalle más adelante.

3.2.2. Rangos articulares

Los rangos articulares de cada una de las articulaciones del brazo humano se recogen en la Tabla 3.2 a continuación. Para entender completamente la tabla hay que tener en cuenta las siguientes secciones de este apartado.

Se han obtenido dos fuentes distintas para la elaboración de la tabla, aunque una de ellas están bastante exentas de datos [18][19].

RANGOS ARTICULARES DEL BRAZO HUMANO						
ARTICULACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	MOVIMIENTO		RANGOS ARTICULARES SEGÚN [18]	RANGOS ARTICULARES SEGÚN [19]	RANGOS ARTICULARES [19]
HOMBRO	GDL 1.- eje transversal ¹	Extensión ⁴		45º a 50º	40º	60º
		Flexión ⁵		180º	150º a 170º	180º
	GDL 2.- eje anteroposterior ²	Aducción ⁶	con extensión	0º a 5º - aproximación	N/D	N/D
			con flexión	30º a 45º	20º a 40º	N/D
		Abducción ⁷		180º	180º	180º
	GDL 3.- eje vertical ³	Rotación longitudinal ⁸	externa	80º	N/D	73º
			interna	95º	N/D	104º
		Rotación horizontal ⁹	flexión	140º	N/D	N/D
CODO	GDL 4	Extensión		145º	130º	150º
		Flexión		0º - según laxitud 5º a 10º	10º	según la laxitud de 2º a 10º
MUÑECA	GDL 5	Supinación ¹⁰		90º	80º a 90º	85º
		Pronación ¹¹		85º	80º a 90º	80º
	GDL 6.- eje transversal	Flexión		85º	N/D	81º
		Extensión		85º	N/D	80º
	GDL 7.- eje anteroposterior	Aducción		40º a 45º desde el eje muñeca a eje dedo medio	N/D	38º
		Abducción		15º	N/D	21º

Tabla 3.2. Rangos articulares del brazo humano.

Dado que los “Cuadernos de fisiología articular” contienen más información que la otra fuente, va a ser esa la que restrinja los rangos máximos y mínimos a lo largo del proyecto.

Los datos de la tabla han tenido en cuenta los rangos máximos a los que una persona podía llegar. Se han tomado los valores máximos dentro del percentil 5%, lo que quiere decir es que el 95% de los humanos son incapaces de llegar a los datos de la tabla. Se han elegido estos datos para dar un mayor margen de seguridad, dado que al utilizar datos de media humana un gran número de pacientes tendrían problemas con sus rangos máximos, que el exobrazo no alcanzaría.

Lamentablemente no es tan sencillo aislar el área de trabajo, pues no es una medida simple. Depende de las dimensiones del brazo humano, de la movilidad

articular y en general de otros aspectos secundarios. Farley aborda el problema de manera geométrica y aísla estas zonas en el plano horizontal [20], como se muestra en la imagen 3.2:

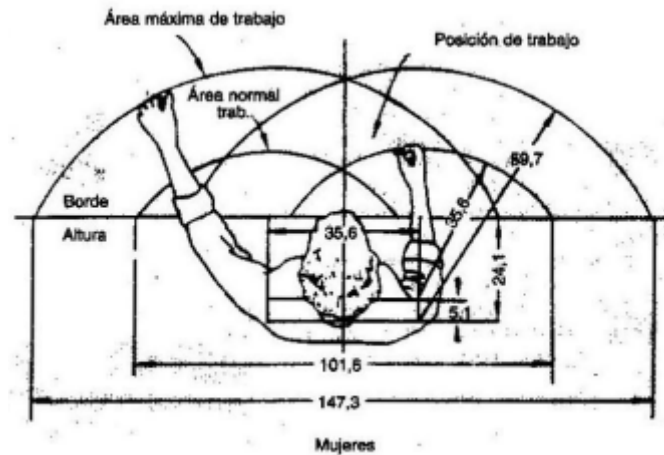


Imagen 3.1. Áreas de trabajo de Farley (mujeres) [cm] [20]

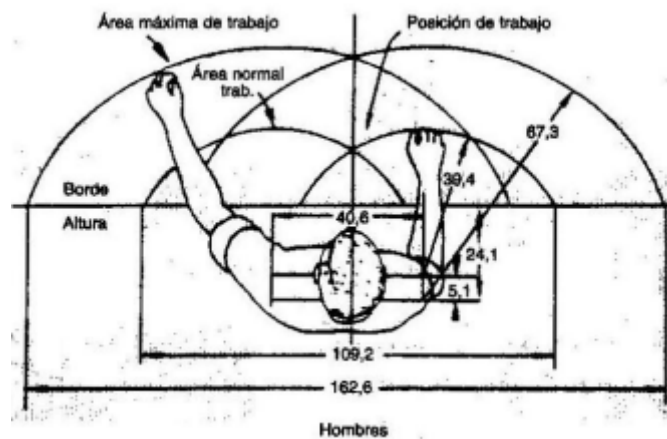


Imagen 3.2. Áreas de trabajo de Farley (hombres) [cm] [20]

Para el diseño que se realizará a lo largo de este proyecto se utilizarán los datos tanto de la tabla “Rangos articulares” como de los datos de Farley. Las mismas áreas de trabajo, propuestas por Barnes y Squires [21], se dejarán a un lado, no por su falta de uso sino porque los valores de Farley son más críticos, y dan un cierto coeficiente de seguridad al proyecto.

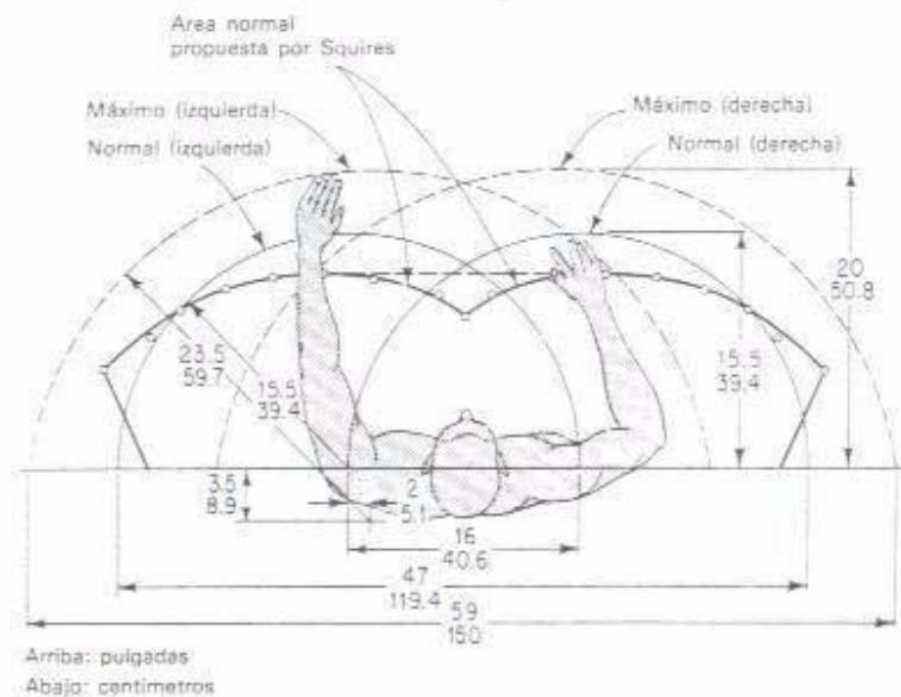


Imagen 3.3. Áreas de trabajo propuestas por Barnes y Squires. [22]

Se puede observar en la imagen 3.2 cómo el límite superior en distancias lo marcan los hombres, con miembros más largos, y el inferior las mujeres. Es por eso que se han tomado los valores por encima del percentil 95 de los hombres para los rangos máximos, y por debajo del 5 en las mujeres para los mínimos.

3.3. Sistema de referencia y nomenclatura

En las siguientes imágenes se ve el cuerpo humano dividido en sus tres planos característicos a la izquierda (plano sagital, plano frontal, plano horizontal) y esos tres planos trasladados al hombro. Este va a ser el sistema de referencia para el proyecto.

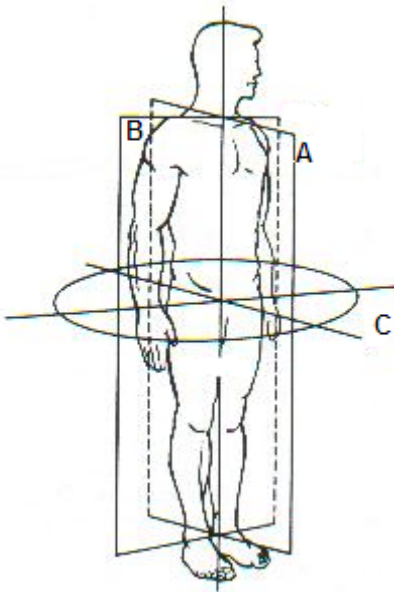


Imagen 3.4. Planos del cuerpo humano

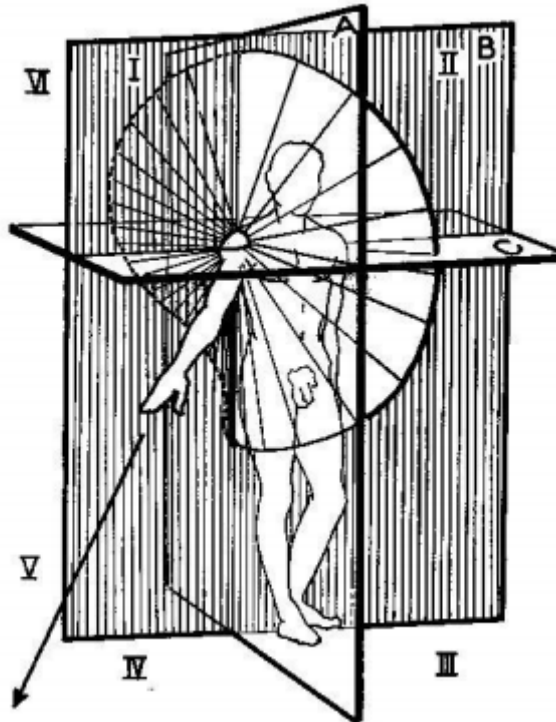


Imagen 3.5. Traslado al hombro

En la imagen 3.4 pueden distinguirse los siguientes elementos: A, plano sagital; B, plano frontal; C, plano horizontal. Los ejes se encuentran en las intersecciones: AB, eje vertical; BC, eje transversal; AC, eje anteroposterior. La imagen 3.5 representa los mismos planos referidos al hombro, así como la curva máxima capaz del brazo humano.

Partiendo del sistema de referencia se procede a avanzar desde el hombro hasta la mano con objeto de observar en detalle rangos, movimientos, articulaciones, ejes de giro, ect.

3.4. Articulaciones del brazo

Se comenzará con la articulación del hombro por tratarse de la articulación “madre” en el sistema de elementos del brazo. Se define “madre” aquello que está aguas arriba en un sistema estructural, e “hijo” aquello que está aguas abajo, o anidado a un objeto “madre”.

3.4.1. Hombro

Debido a que los movimientos del hombro se realizan en tres ejes, es la articulación con mayor movilidad del cuerpo humano. Las articulaciones que se distinguen dentro del hombro son: glenohumeral, articulación esferoidea poliaxial; acromioclavicular, articulación plana compuesta; esternoclavicular: sillar biaxial. Aunque debido a la complejidad del vocabulario no se utilizarán estos términos.



Imagen 3.6. Articulaciones acromioclavicular y hombro.

En la imagen 3.6 se pueden distinguir los siguientes elementos numerados: (1) Articulación acromioclavicular y ligamentos; (2) Ligamento coracoclavicular; (3) Arco coracoacromial; (4) Cápsula fibrosa articulación hombro y ligamentos glenohumerales; (5) Ligamento transverso; (6) Ligamento coracohumeral.

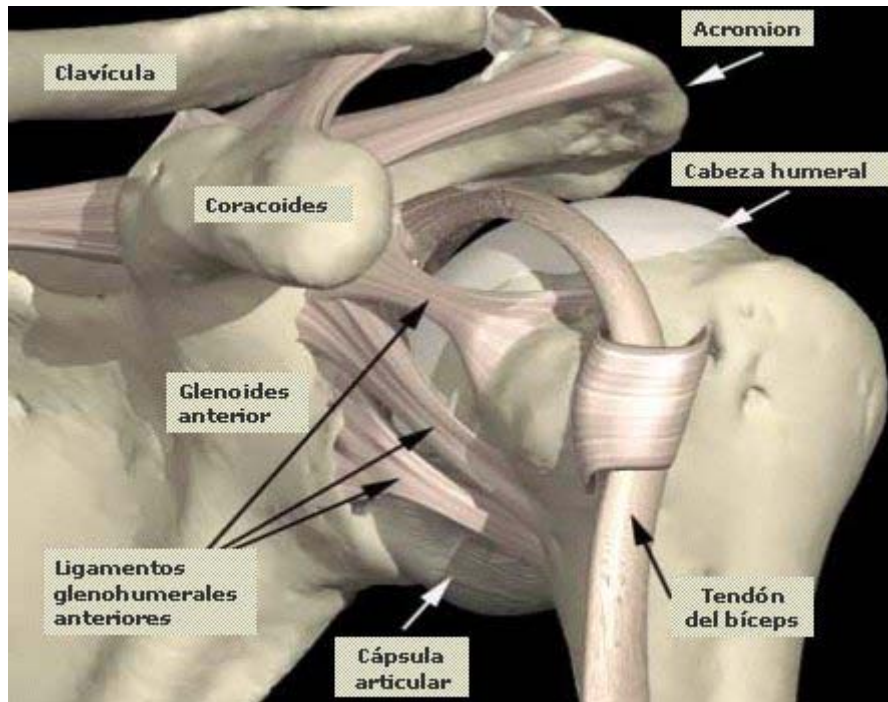


Imagen 3.7. Articulación del hombro.

a) Eje transversal. Imagen 3.8.

Este eje dirige los movimientos contenidos en el plano sagital (o plano de perfil). Los movimientos asignados a este eje son los de:

- a.1) Flexión: movimiento de elevación del brazo en el plano sagital en la dirección de la mirada. Ejemplo: el movimiento desarrollado por un nadador de estilo espalda.
- a.2) extensión: movimiento de elevación del brazo en el plano sagital en dirección a su parte anterior (espalda). Ejemplo: el movimiento típico de un atleta en las carreras de relevos cuando se dispone a recoger el testigo.

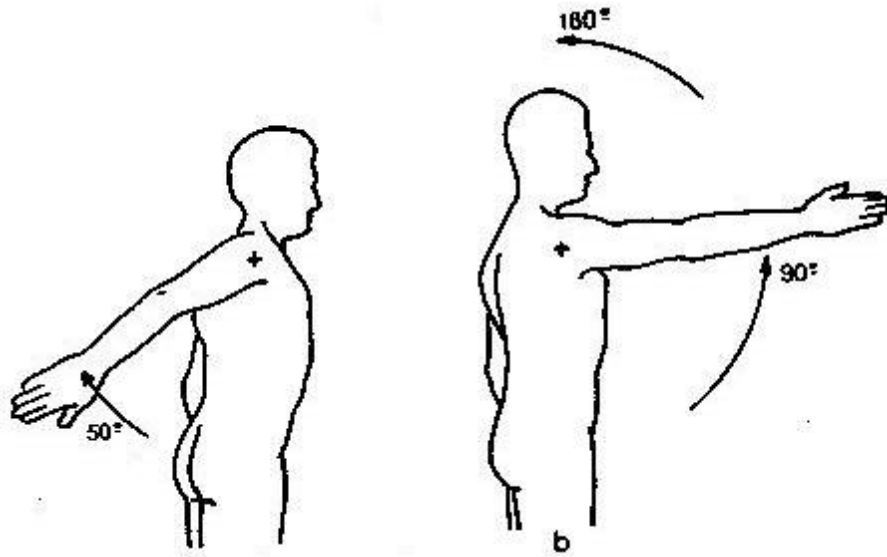


Imagen 3.8. Movimientos en torno al eje transversal. Izquierda, extensión. Derecha, flexión.

b) Eje anteroposterior.

Este eje es el de giro de los movimientos contenidos en el plano frontal. Los movimientos asignados a este eje son:

b.1) Aducción: sólo posible con una posición del brazo alejada de la posición de referencia (Imagen 3.9.), siendo:

b.1.1) Aducción y extensión: pasar el brazo por la parte anterior del sujeto. Ejemplo: el movimiento efectuado cuando se esconde algo detrás de la espalda.

b.1.2) Aducción y flexión: pasar el brazo por la parte delantera del sujeto. Ejemplo: el movimiento realizado al limpiar una superficie horizontal en la dirección contraria al brazo utilizado.

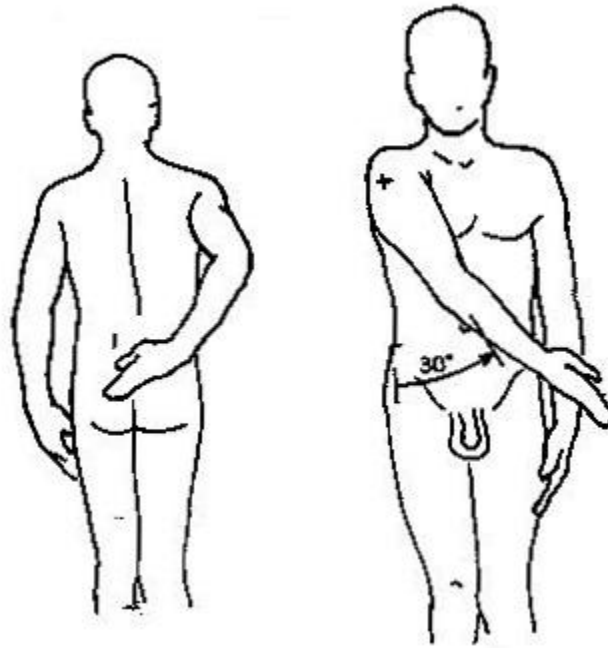


Imagen 3.9. Movimientos de aducción. Aducción y extensión, izquierda. Aducción y flexión, derecha.

b.2) Abducción: Separación con respecto al tronco en el plano frontal. Es el movimiento que emplearía alguien en una conferencia para levantar la mano y pedir la palabra. Imagen 3.10.

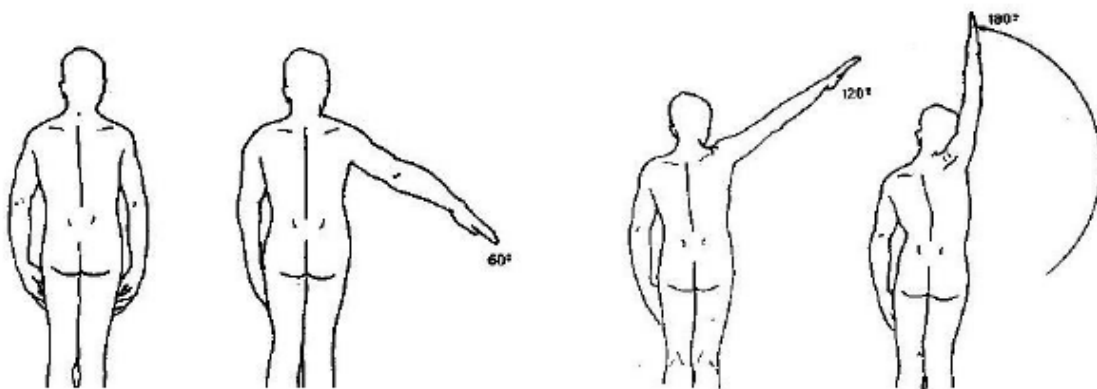


Imagen 3.10. Secuencia del movimiento de abducción

c) Eje vertical

Es el eje en torno al cuál se ejecutan los movimientos contenidos en el plano horizontal, es decir, aquél que sólo podrá ser visto en planta. Hay dos grupos de movimientos según sea la posición de referencia elegida. Estos dos grupos deben ser expuestos para analizar a posteriori los rangos articulares.

c.1.) Rotación sobre el eje longitudinal. La posición de referencia elegida en este grupo es con el brazo superior en paralelo al tronco, mientras que el antebrazo está flexionado por el codo a 90° con el eje natural de la posición de reposo. De esta manera, el eje del brazo superior coincide con el de giro. Sus movimientos son:

c.1.1) Rotación externa: el brazo va desde la posición de reposo en dirección a la espalda, respetando el eje de giro vertical.

c.1.2) Rotación interna: el dorso de la mano queda contra la espalda por detrás de esta. No es un movimiento continuo sino que sirve para establecer el rango articular del eje vertical en un movimiento antagónico [WTF] con el anterior.

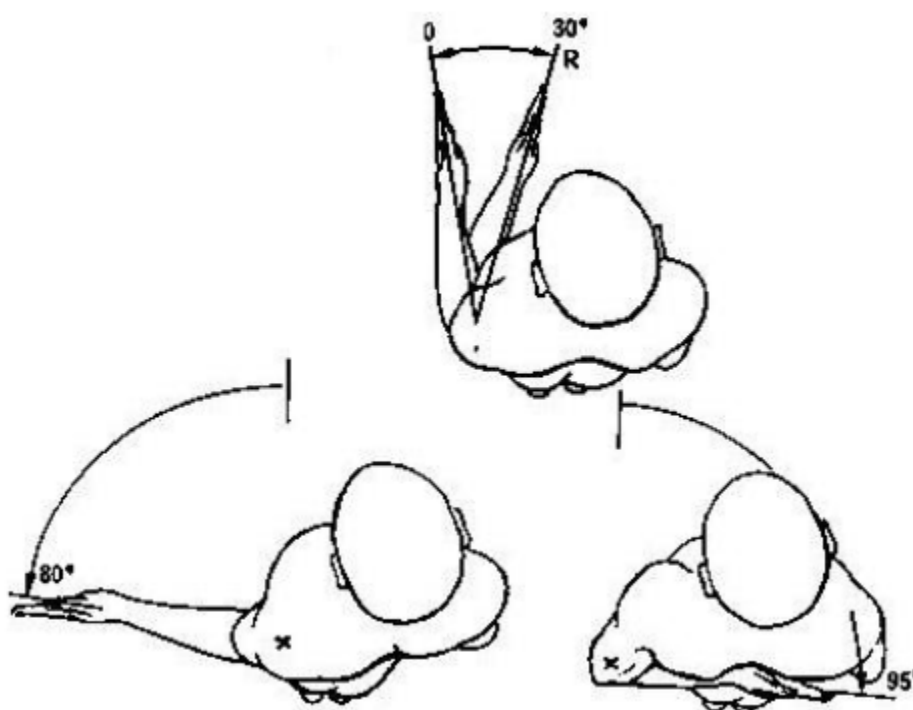


Imagen 3.11. Rotaciones longitudinales. Izquierda, rotación externa. Derecha y arriba, rotaciones internas.

c.2) Rotaciones horizontales. Aquí la posición de referencia es la de brazo completamente extendido a 90° siguiendo un movimiento de abducción. Ejemplo: señal de un guarda de tráfico cuando quiere detener los coches a su espalda.

c.2.1) Flexión horizontal. Desde la posición de referencia es llevar el brazo a su lado, de manera que la mano quede lo más cerca posible de la espalda.

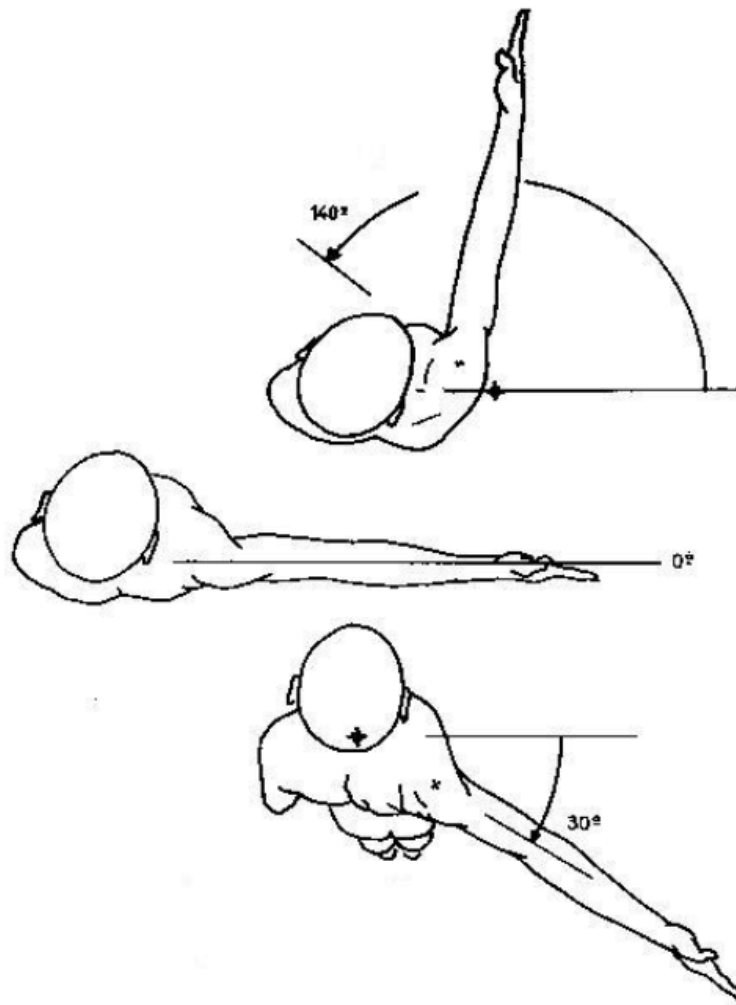


Imagen 3.12. Rotaciones horizontales. Arriba, flexión horizontal. Centro, posición de referencia. Abajo, extensión horizontal.

3.4.2. Codo

En el codo existe un solo grado de libertad. Este movimiento nos permite flexionar o extender el antebrazo. Es posible tomar como parte de los grados de libertad del codo el movimiento de prosupinación, ya que envuelve a la articulación radio-cubital superior además de a la inferior.

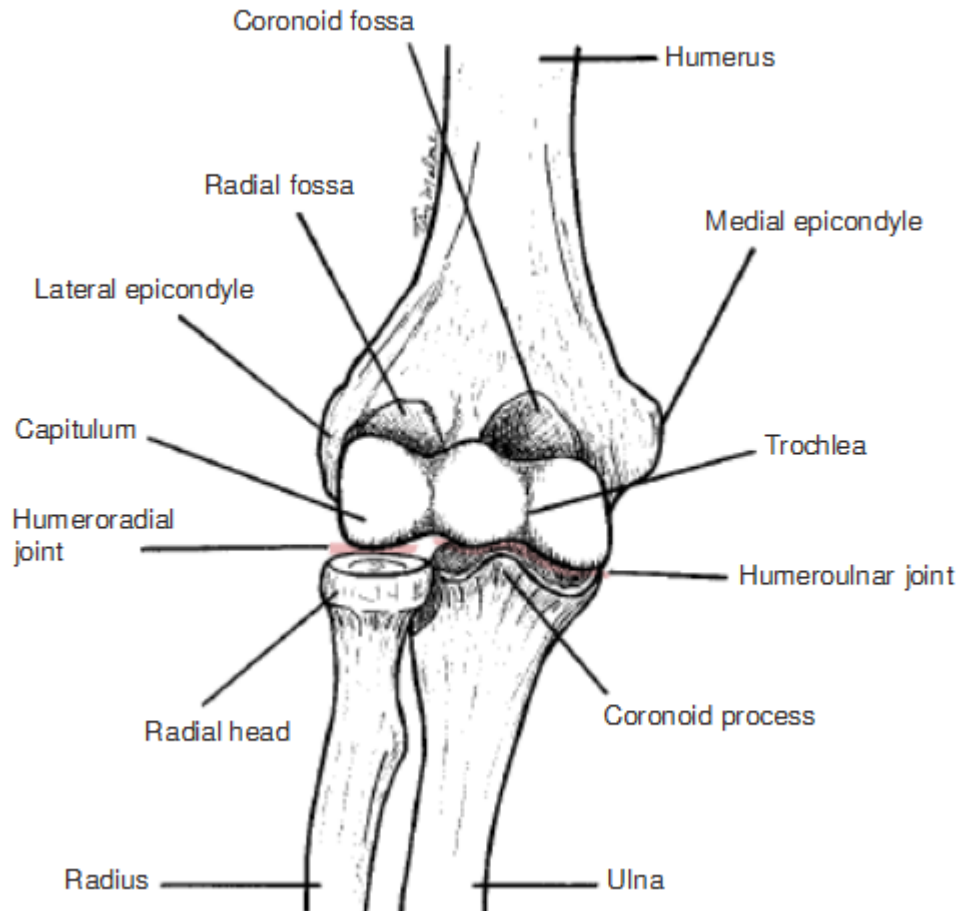


Imagen 3.13. Vista anterior del codo [23]

En la imagen 3.13 se muestran las siguientes articulaciones humerocubital y humeroradial. Humerus: húmero; Radius: radio; Ulna: cubito; Lateral epicondyle: epicóndilo lateral; Medial epicondyle: epicóndilo medio; Coronoid fossa: fosa coronoide ; Radial fossa: fosa radial; Humeroradial joint: articulación humeroradial; Humeroulnar joint: articulación humero-cubital; Capitulum: cóndilo ; Trochlea: tróclea; Radial head: cabeza del radio ; Coronoid process: apófisis coronoide.

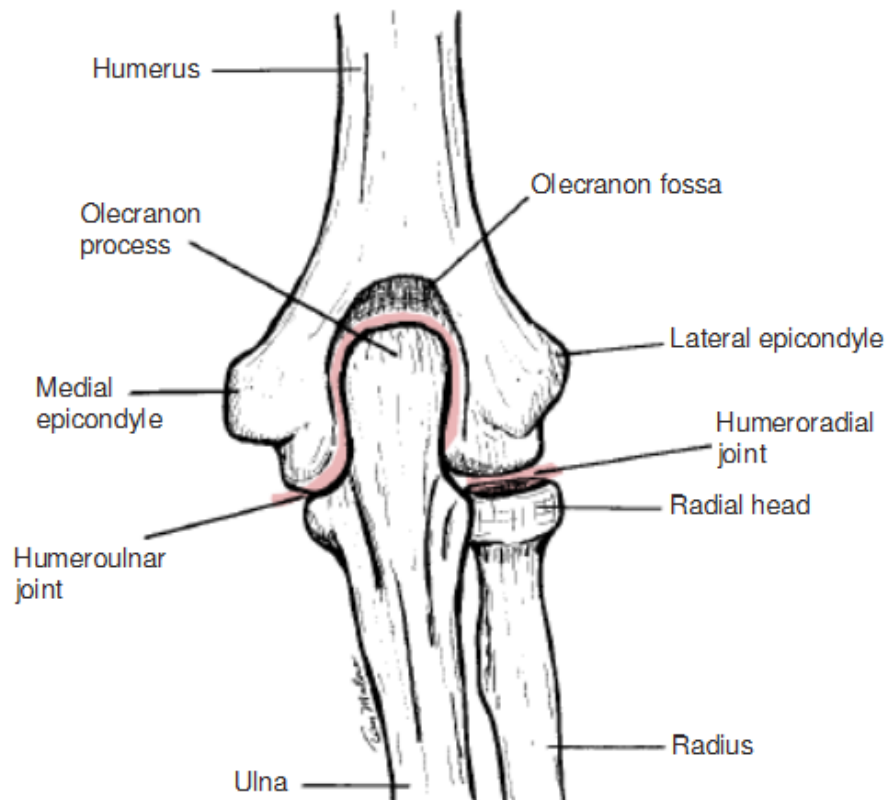


Imagen 3.14. Vista posterior del codo que muestra las articulaciones humeroradial y humerocubital
Olecranon process: proceso olecraneano; Olecranon fossa: fosa olecraneana [23]

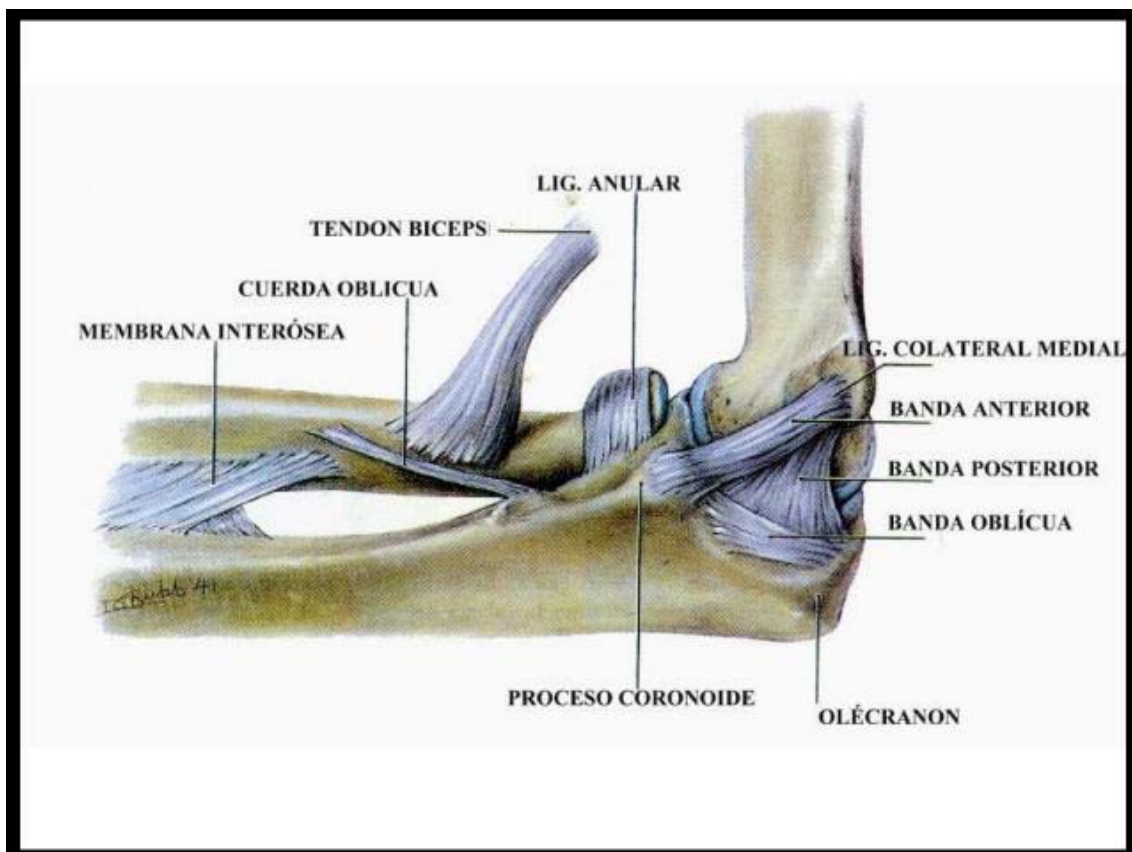


Imagen 3.15. Articulación del codo de perfil

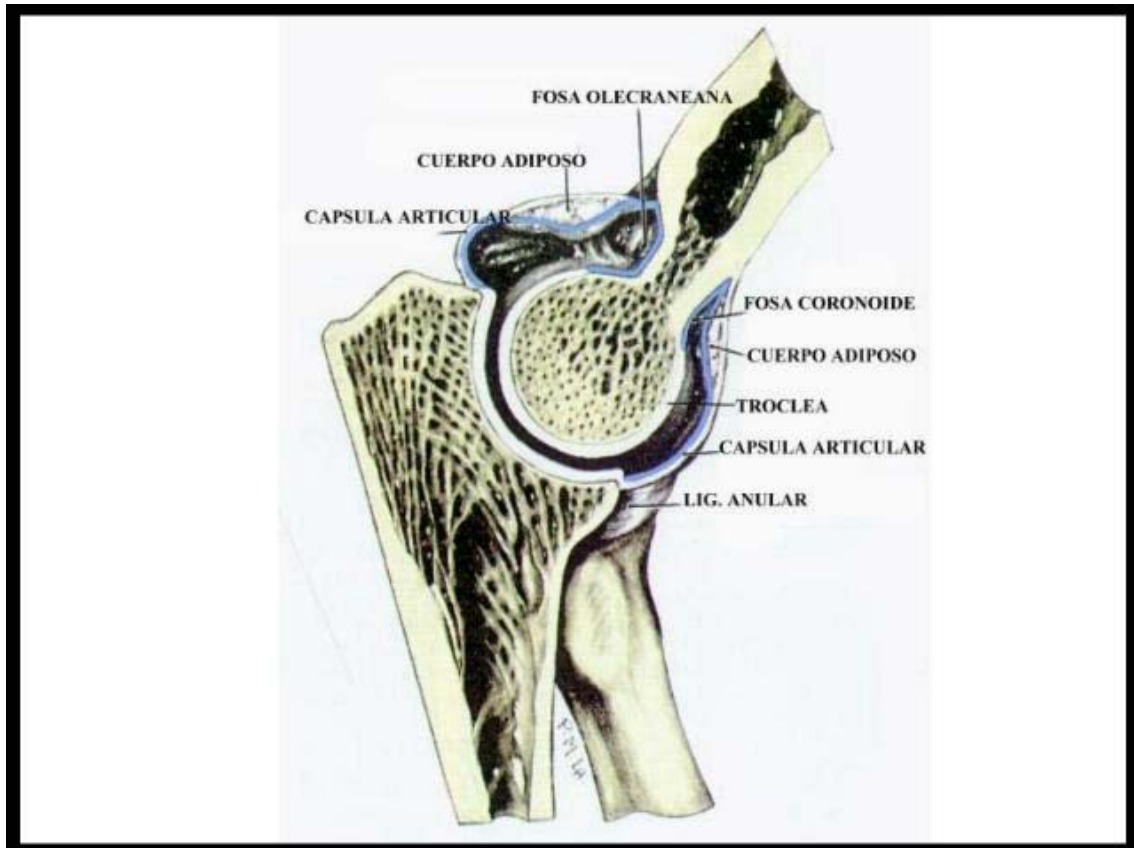


Imagen 3.16. Sección lateral del codo

a) **Flexión.** Es el movimiento que lleva el antebrazo a entrar en contacto con el brazo. Ejemplo: movimiento típico de un levantador de pesas que ejercita sus bíceps. Tendrá distintos rangos articulatorios en función de si sus movimientos son pasivos o activos.

b) **Extensión.** Es el movimiento antagonista del anterior, que lleva al brazo a la posición de referencia y más allá si hay laxitud.

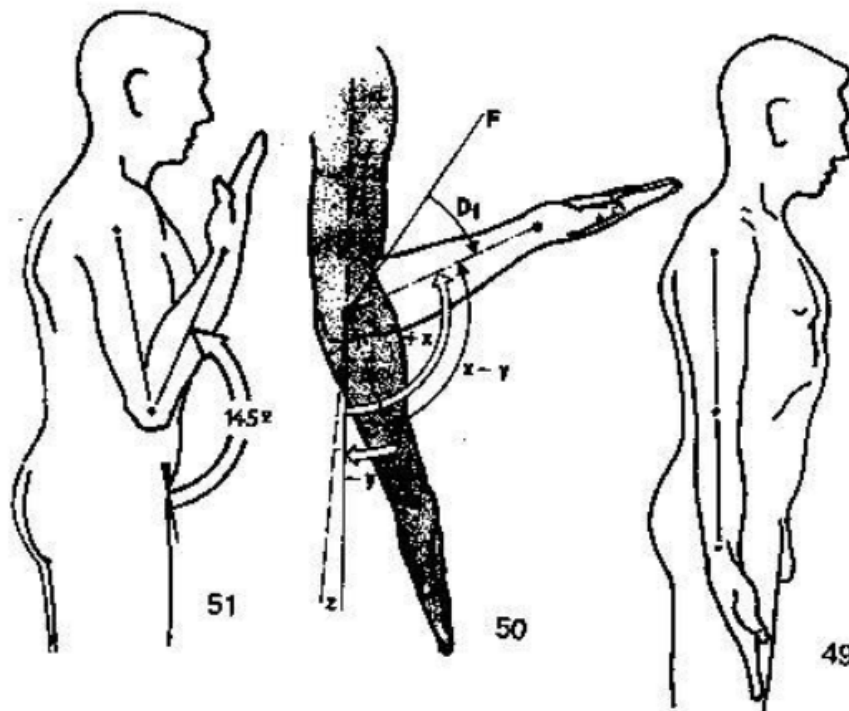


Imagen 3.17. Movimientos de flexión y extensión. Izquierda, flexión. Derecha, extensión en la posición de referencia.

3.4.3. Muñeca

La muñeca consta de tres grados de libertad: eje longitudinal, eje transversal y eje anteroposterior.

a) Eje transversal

Alrededor de este eje se produce el movimiento de pronosupinación. Ese movimiento precisa la intervención de la asociación mecánica de dos articulaciones: la radiocubital superior y la inferior. Al intervenir la inferior es tomado como un grado de libertad de la muñeca.

La posición intermedia será la del brazo superior pegado al tronco y el antebrazo levantado 90° respecto al eje longitudinal del brazo superior. La mano estará situada tal que el pulgar esté apuntado hacia arriba. La posición recuerda a la actitud de dar la mano en los países occidentales.

a.1) Supinación. Es el movimiento de giro del antebrazo sobre su eje longitudinal tal que desde la posición de referencia la palma de la mano queda hacia arriba y el pulgar de la mano en el lado más alejado al torso. La postura final recuerda a alguien que espera recibir algo en la palma de la mano.

a.2) Pronación. Es el movimiento antagónico. Desde la posición de referencia, el pulgar queda pegado al torso. Recuerda vagamente a la postura que la mano toma cuando se va a acariciar algo.

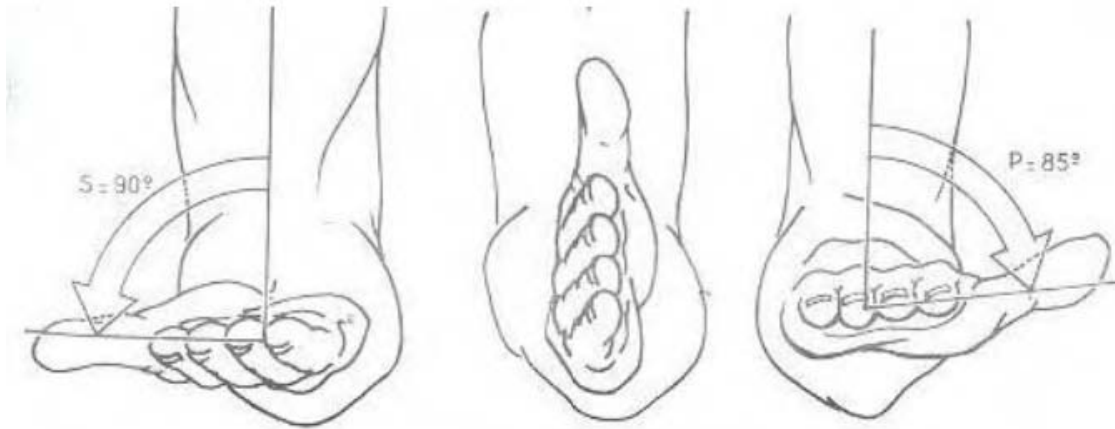


Imagen 3.18. Movimientos de pronosupinación. Izquierda, supinación. Centro, posición de referencia. Derecha, pronación.

b) Ejes transversal y anteroposterior

la posición de referencia es el antebrazo en supinación completa, es decir, con la palma hacia arriba. De esta manera quedan definidos dos ejes: transversal y anteroposterior. Hay que añadir que la mayoría de movimientos de la muñeca no incluyen a la vez estos dos grados de libertad.

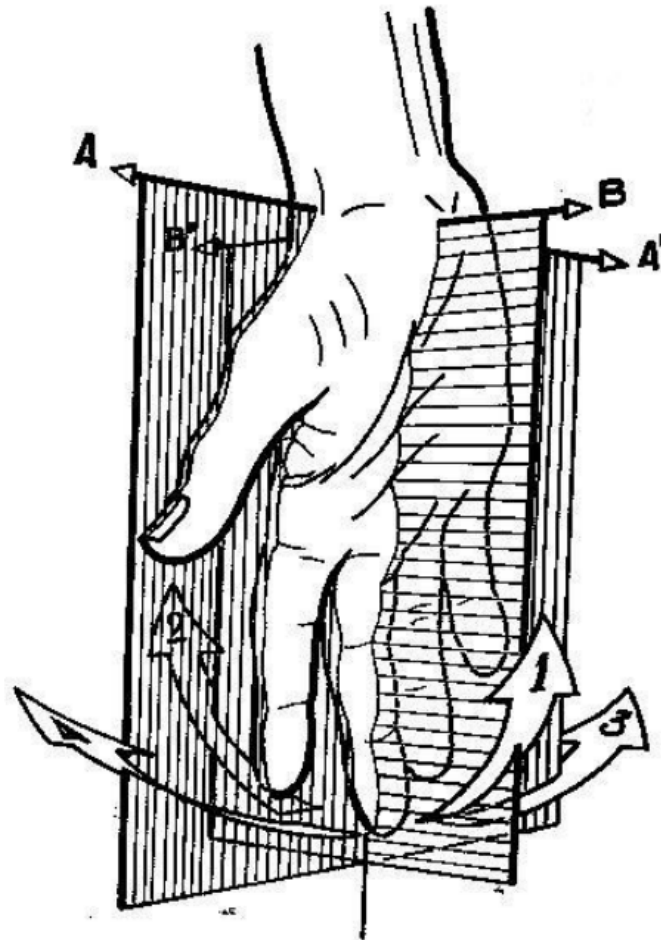


Imagen 3.19. Ejes y planos de movimiento de la muñeca. Eje AA', transversal. Eje BB', anteroposterior.

Quedan ahora definidos dos grados de libertad, uno por cada eje:

b.1) Eje transversal. Flexo-extensión

b.1.1) Flexión. Es el movimiento en que la palma queda hacia arriba, estando el eje transversal de giro en la muñeca.

b.1.2) Extensión. Es el movimiento antagonista. La palma queda hacia abajo.

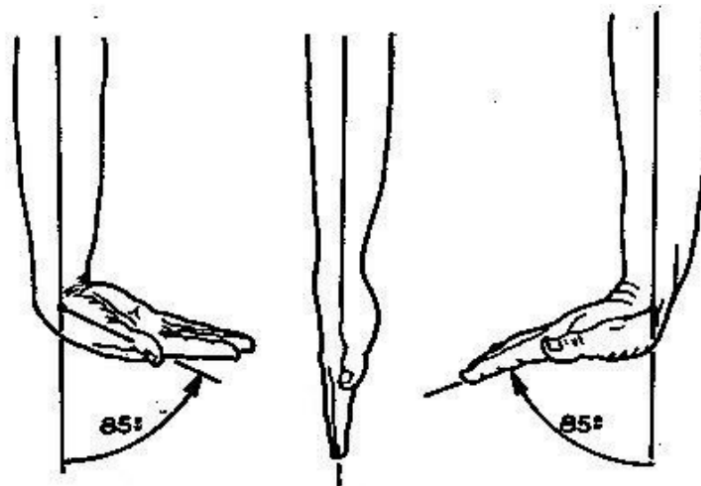


Imagen 3.20. Movimientos en torno al eje transversal. Izquierda, flexión. Centro, posición de referencia. Derecha, extensión.

b.2) Eje anteroposterior. Aducción-Abducción

b.2.1) Aducción. considerando el eje de giro en la muñeca, es el giro en torno al eje anteroposterior que deja el pulgar apuntando hacia el suelo. Nótese que la cantidad de grados de giro varía con respecto a qué dedo esté tomada la medida. Estando el eje en la muñeca y la línea de referencia en el dedo medio, el ángulo está entre los 40 y 45 grados.

b.2.2) Abducción. El antagonista del anterior. El giro ocasiona que sea el dedo meñique el que queda apuntando al suelo.

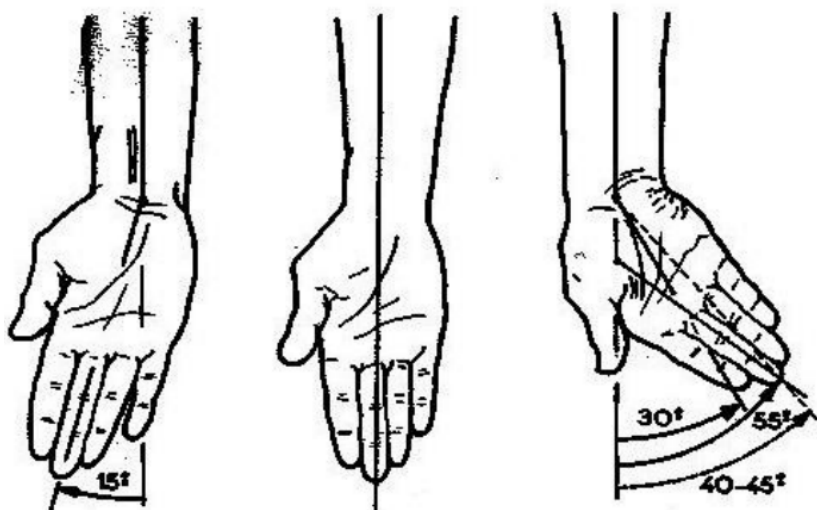


Imagen 3.21. Movimientos en torno al eje anteroposterior. Izquierda, abducción. Centro, posición de referencia. Derecha aducción.



CAPÍTULO IV. DISEÑO CONCEPTUAL Y ESFUERZOS MECÁNICOS ESTÁTICOS EN EL BRAZO

4.1. Justificación de este capítulo

Este capítulo se centrará en la evaluación mediante técnicas clásicas de cálculo de los pares y axiles iniciales para el proceso iterativo de la búsqueda de un modelo estable. De este modo, se conseguirán unos primeros datos para ayudar a seleccionar un rodamiento para las simulaciones.

A pesar de que en etapas posteriores del proyecto se va a hacer uso de técnicas más sofisticadas mediante ordenador para el cálculo de esfuerzos en el codo del modelo, se ha decidido incluir un precálculo de un modelo matemático simple por dos motivos:

- tener una noción de la magnitud de los esfuerzos en primera instancia, con un cálculo simple y rápido,
- para el proceso iterativo de la elección del rodamiento, tener unos valores iniciales de cargas y esfuerzos máximos (o por lo menos aproximados) resulta muy útil.

Este capítulo da así mismo la oportunidad de incluir el diseño conceptual del modelo.

Es importante resaltar que como se ha comentado con anterioridad, este modelo, resultado del proyecto, es una simplificación de la estructura que tiene limitaciones. Hay preguntas que este proyecto no responde, como cual va a ser el método de anclaje al cuerpo, cómo se va a colocar el antebrazo sobre una persona, materiales adecuados en contacto con la piel. Por lo tanto esta estructura no está pensada para su aplicación como exoesqueleto para un ser humano, si no como banco de pruebas para el diseño de los actuadores que pudieran utilizarse en un exoesqueleto. De esta forma la estructura debe simular lo que sería el comportamiento de un brazo humano con el exoesqueleto colocado en cuanto a pares, velocidades y fuerzas, pero no sirve como exoesqueleto.

4.2 Diseño conceptual

En este apartado se pretende dar una visión general de las dimensiones y formas que tendrá el modelo. Aunque comenzaron como valores orientativos que podrían ir modificándose a medida que avance el proyecto se plasmarán aquí los valores finales con tal de no representar toda la evolución de formas consideradas.

El modelo, en su versión más simple, constará de dos segmentos, uno representando al brazo y otro al antebrazo. Las medidas de longitud han sido tomadas del capítulo anterior.

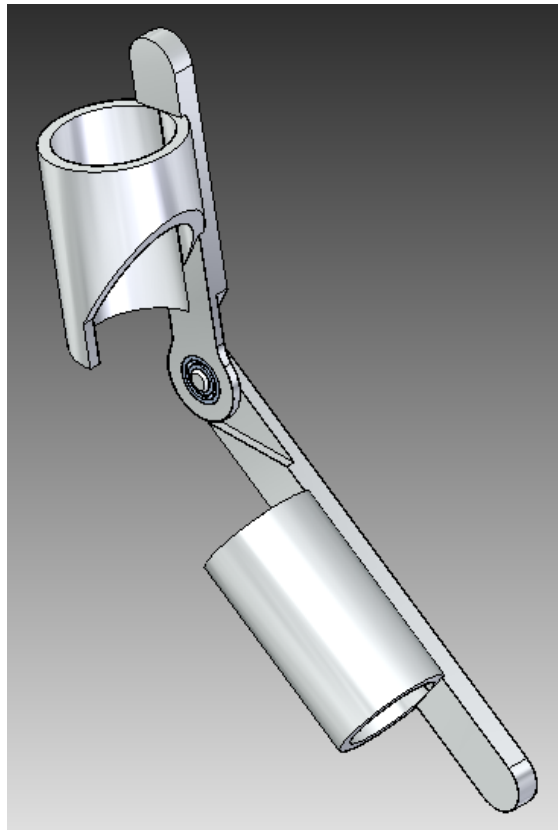
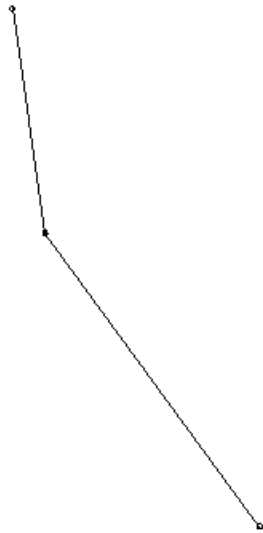


Imagen 4.1. Modelo conceptual inicial y resultado final.

Además de la longitud del brazo y antebrazo habrá que considerar en el proyecto:

- diseño de cada uno de los elementos,
- anclaje entre ellos,
- materiales necesarios.

4.3. Masas y longitudes

Para el cálculo de los esfuerzos sobre la estructura se han tomado las siguientes relaciones para los valores de carga del cuerpo humano. Mediante estos datos se calcularán los pares máximos de la articulación del codo.

Segmento	Límites superior/inferior	Peso relativo	C.D.G.		Densidad
			Proximal	Distal	
Antebrazo + Mano	Línea biepicondílea/ IFP del índice	0,022	0,682	0,318	1,14
Brazo	Espacio acromiohumeral/ líneabiepicondílea	0,028	0,436	0,564	1,07

Tabla 4.1. Datos necesarios para un modelo matemático sencillo del brazo humano.

Teniendo en cuenta que el peso relativo se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Peso relativo} = \frac{\text{Peso del miembro}}{\text{Peso del cuerpo}}$$

Los términos “proximal” y “distal” hacen referencia a la parte más cercana y más lejana desde donde se miden las distancias en relación al tronco.

Para los valores de carga del exobrazo en sí se han utilizado los siguientes valores:

Segmento	Masa [kg]
Exobrazo	3
Exoantebrazo	2

Tabla 4.2. Datos de la masa para los distintos elementos del exoesqueleto.

4.4. Materiales utilizados en la modelación.

Los materiales elegidos han sido:

- Acero Inoxidable 420 para el rodamiento.

Se trata de un estándar en rodamientos, y viene dado por el fabricante. Con objeto de no albergar repeticiones sus características se han reflejado en la documentación gráfica del proyecto (Anexo E).

- Aluminio 7075-T6 para las piezas exobrazo y exoantebrazo.

Se ha elegido el aluminio debido tanto a su bajo costo como a sus propiedades mecánicas en función de su peso. Para un mismo volumen de metal, el aluminio tiene un tercio de su masa. En concreto se ha elegido la serie 7000, que al poseer un bajo porcentaje en zinc hace que llegue a tensiones de 600 MPa sin roturas.

Otra ventaja del aluminio es su corrosión atmosférica nula habituales en otros metales. Es por ello que para el RoboticsLab de la Carlos III es un material muy adecuado para la durabilidad del modelo sin tratamiento superficial.

Estos datos anteriores y el hecho de que fabricar piezas en aluminio serie 7000 no es costoso para la Carlos III han sido los factores para elegir este tipo de material para el proyecto.

4.5. Diagramas de fuerzas y momentos en la representación conceptual

Para el cálculo del modelo como estructura se ha seguido un procedimiento estándar que se explicará a continuación.

Se ha tomado la estructura compuesta por el brazo y el exoesqueleto como una viga empotrada y una “articulación” con otra viga en ménsula. Dado que es en el punto de articulación en el que se insertará el motor, lo tomaremos como un punto fijo, de modo que la barra será continua, formando un ángulo. Esto es, por supuesto, una idealización del brazo, debido a que el codo, en su flexoextensión, no actúa como una rótula perfecta, sino que tiene un deslizamiento muy suave.

Se han tomado varias posturas para buscar los máximos momentos flectores, los cortantes, normales y momentos torsores. Para la modelización se han tomado las cargas continuas a lo largo del brazo, siendo sus valores:

P – carga puntual sobre la mano

q – carga distribuida del antebrazo y la mano, más la del exoesqueleto

p – carga distribuida del brazo, más la del exoesqueleto

En cuanto a los parámetros constructivos:

l1 – longitud del antebrazo y la mano

l2 – longitud del brazo

α – ángulo formado entre brazo y antebrazo, estando el antebrazo a 0° sobre la horizontal

β – ángulo formado entre brazo y antebrazo, estando ambos segmentos en posición horizontal

Para tener todos los esfuerzos máximos se han planteado varias posiciones para el brazo.

Posición I

Antebrazo en horizontal y brazo formando un ángulo “a”, tal como se aprecia en la figura:



Imagen 4.2. Representación de la posición estática I.

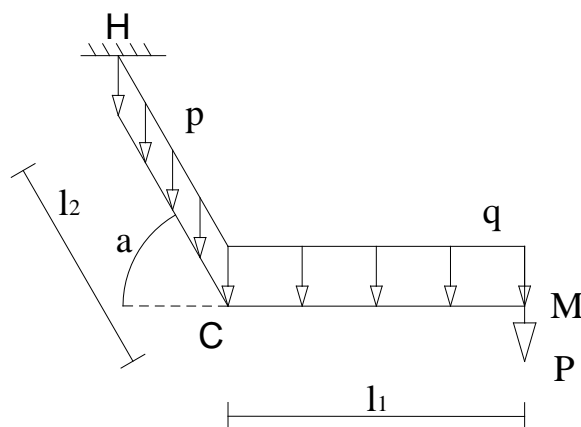


Imagen 4.3. Diagrama de fuerzas de la posición I (a)

Para el análisis de esfuerzos se corta en la imagen 4.3 antes del codo (C), dando como resultado el segmento libre de la imagen 4.4.

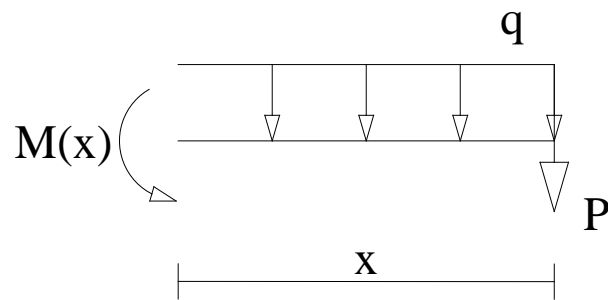


Imagen 4.4. Diagrama de fuerzas de la posición I (b)

Tomando momentos en el extremo:

$$\sum M = 0$$

$$M(x) = Q \cdot x + \frac{q \cdot x^2}{2}$$

Particularizando en el codo:

$$M(x = l_1) = Q \cdot l_1 + \frac{q \cdot l_1^2}{2}$$

Los cortantes son la resultante de los esfuerzos verticales. En el codo:

$$Q = P + q \cdot l_1$$

Se estudia ahora el brazo, “empotrado” en el hombro, sustituyendo el antebrazo por sus esfuerzos resultantes en C:

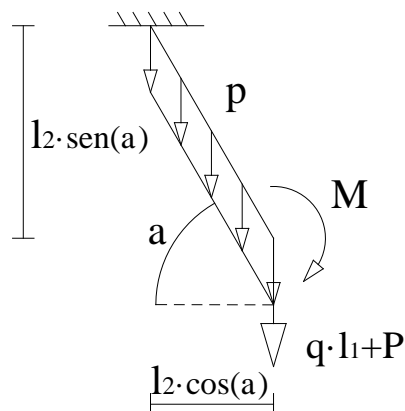


Imagen 4.5. Diagrama de fuerzas de la posición I (c)

Se resuelve mediante el método de superposición, separando el brazo en dos estados:
Brazo (I) y Brazo (II).

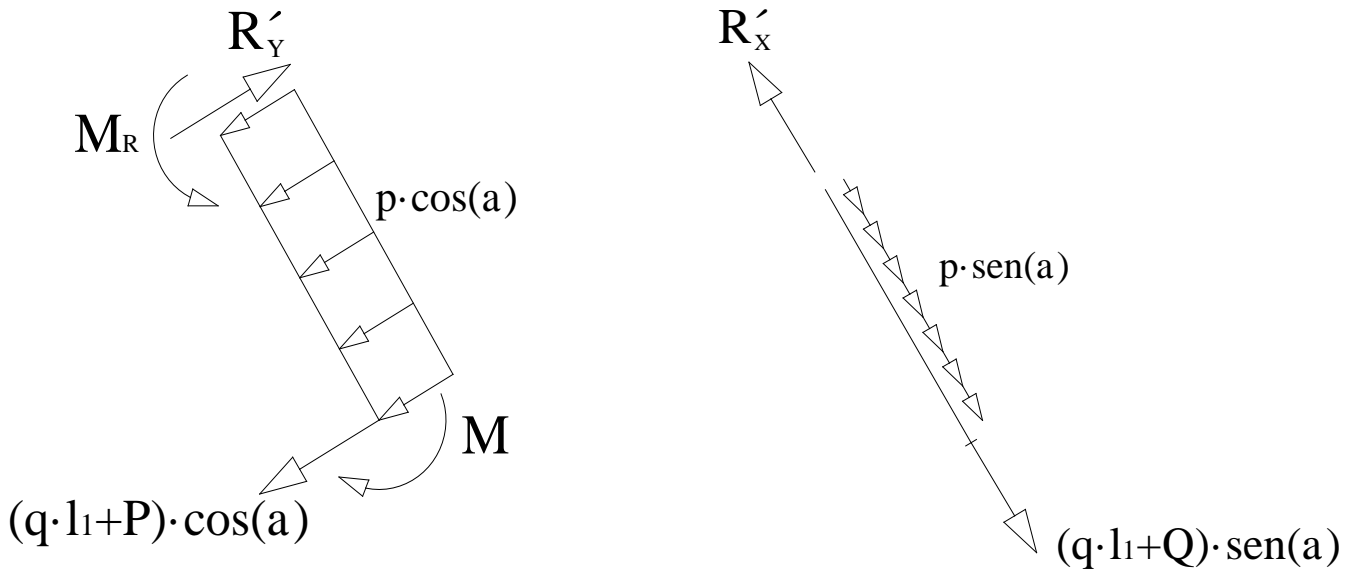


Imagen 4.6. Diagrama de fuerzas de la posición I (d)

Obtenemos las reacciones en función del ángulo:

$$M_R(\alpha) = \left[\frac{p \cdot l_2^2}{2} + (q \cdot l_1 + P) \cdot l_2 \right] \cdot \cos(\alpha) + P \cdot l_1 + \frac{q \cdot l_1^2}{2}$$

$$R'_Y(\alpha) = (q \cdot l_1 + P) \cdot \cos(\alpha) + p \cdot \cos(\alpha) \cdot l_2$$

$$R'_X(\alpha) = (q \cdot l_1 + P) \cdot \sin(\alpha) + p \cdot \sin(\alpha) \cdot l_2$$

Se calcula ahora el ángulo que da los esfuerzos máximos:

$$\frac{\partial(M_R(\alpha))}{\partial \alpha} = \left[\frac{p \cdot l_2^2}{2} + (q \cdot l_1 + P) \cdot l_2 \right] \cdot (-\sin(\alpha)) = 0$$

Con lo que $M_{R_{\max}}$ se dará cuando $\alpha=0^\circ$.

$$\frac{\partial(R'_Y(\alpha))}{\partial \alpha} = (q \cdot l_1 + P) \cdot (-\sin(\alpha)) + p \cdot (-\sin(\alpha)) \cdot l_2 = 0$$

De nuevo, el máximo cortante vendrá dado por $\alpha=0^\circ$

$$\frac{\partial(R'_x(\alpha))}{\partial\alpha} = (q \cdot l_1 + P) \cdot \cos(\alpha) + p \cdot \cos(\alpha) \cdot l_2 = 0$$

El máximo axil aparece cuando $\alpha=90^\circ$

Posición II

En la posición II el brazo está colocado en horizontal, dando un ángulo de 90° con respecto a la vertical. Se ha colocado de este modo ya que con los datos del apartado anterior se ha visto que es el modo en que los momentos flectores son máximos.

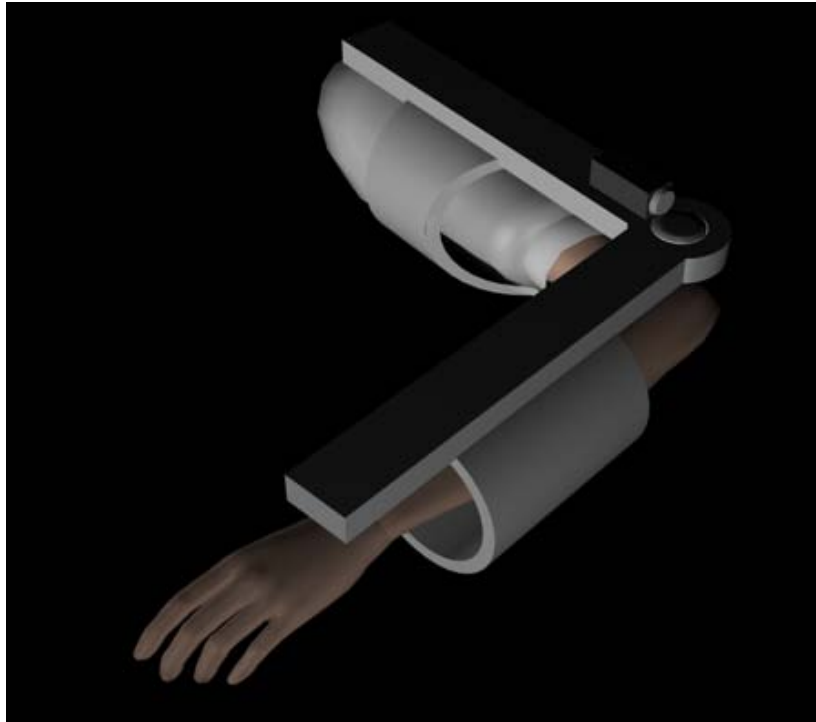


Imagen 4.7. Representación de la posición estática II.

El ángulo β es ahora el que forma el brazo con el antebrazo (unión del codo, C).

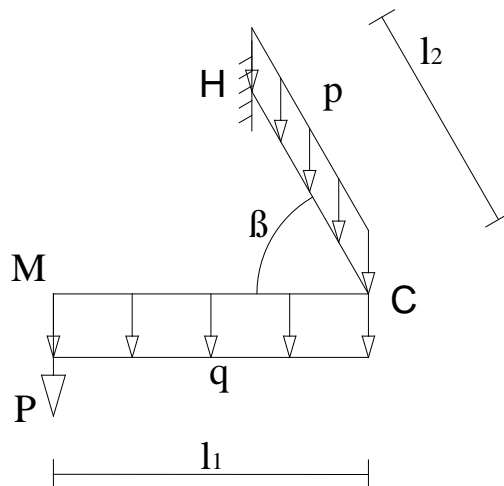


Imagen 4.8. Diagrama de fuerzas de la posición II (a)

Siguiendo el procedimiento del apartado anterior, calculamos la distribución de esfuerzos en la barra MC:

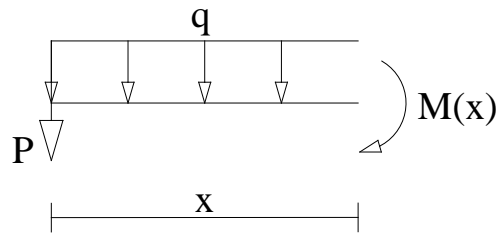


Imagen 4.9. Diagrama de fuerzas de la posición II (b)

De aplicar momentos en el extremo:

$$\sum M = 0$$

$$M(x) = \frac{q \cdot x^2}{2} + P \cdot x$$

En el codo se tendrá:

$$M_{\beta}(x = l_1) = P \cdot l_1 + \frac{q \cdot l_1^2}{2}$$

Este momento es un momento flector sobre la barra MC, pero se transmite como una componente de momento flector (M_Y) a lo largo del eje HC y como un momento torsor (M_X) a lo largo del mismo eje. Cumplen las siguientes ecuaciones:

$$M_{\beta} = \sqrt{M_X^2 + M_Y^2}$$

$$M_X = M_{\beta} \cdot \cos(\beta)$$

$$M_Y = M_{\beta} \cdot \sin(\beta)$$

Aplicando sobre el segundo elemento (barra HC) los esfuerzos generados en la barra MC obtenemos:

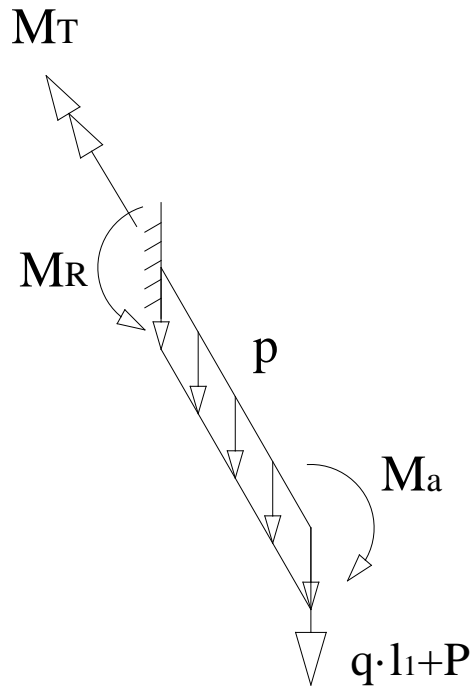


Imagen 4.10. Diagrama de fuerzas de la posición II (c)

De nuevo se aplica sumatoria de momentos:

$$M(x) - M_Y - (P + q \cdot l_1) \cdot x - \frac{p \cdot x^2}{2} = 0$$

$$M(x) = M_\beta \cdot \text{sen}(\beta) + (P + q \cdot l_1) \cdot x + \frac{p \cdot x^2}{2}$$

$$M(x) = \left(\frac{q \cdot l_1^2}{2} + P \cdot l_1 \right) \cdot \text{sen}(\beta) + (P + q \cdot l_1) \cdot x + \frac{p \cdot x^2}{2}$$

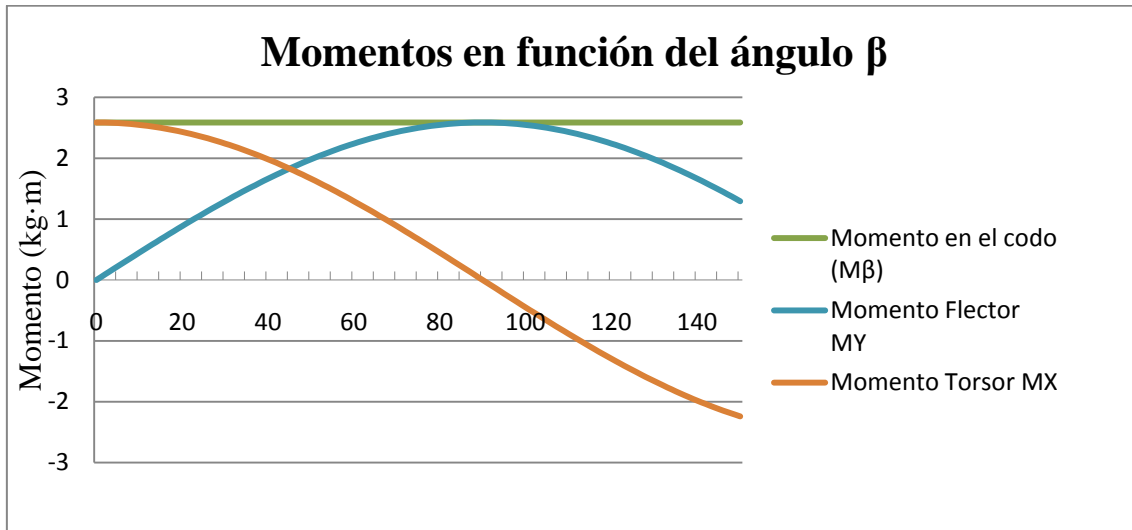
Particularizando en el extremo, tendremos el momento flector máximo en función de β :

$$M_R(\beta, x = l_2) = \left(\frac{q \cdot l_1^2}{2} + P \cdot l_1 \right) \cdot \text{sen}(\beta) + (P + q \cdot l_1) \cdot l_2 + \frac{p \cdot l_2^2}{2}$$

El momento torsor tendrá como único componente M_X :

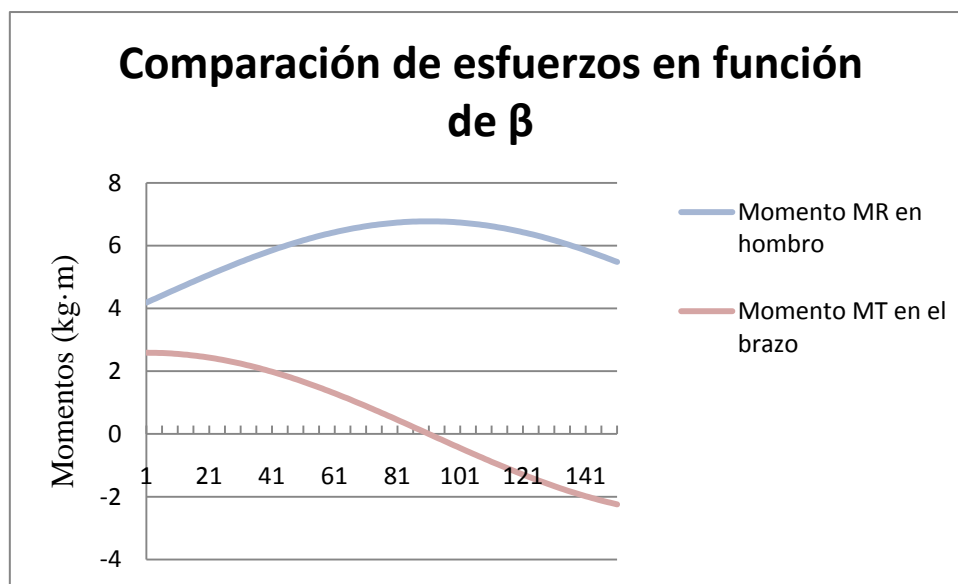
$$M_T(\beta) = M_X = M_\beta \cdot \cos(\beta)$$

De manera gráfica:



Gráfica 4.1. Obtención de datos sobre el codo.

En la gráfica 4.1 se puede observar la variación de los momentos flectores y torsores sobre el codo en función del ángulo de apertura del codo.



Gráfica 4.2. Obtención de datos sobre el hombro.

Se observa de los datos obtenidos que el momento torsor máximo sobre el codo aparece en un ángulo de 90°, mientras que el momento flector máximo se alcanza a los 0°. La suma de ambos es constante, y es el momento resultante en el codo en todo momento.

Posición III

En esta posición el brazo está completamente en vertical, quedando todas las cargas como axiles en la dirección del brazo.

$$N = q \cdot l_2 + p \cdot l_1 + P$$

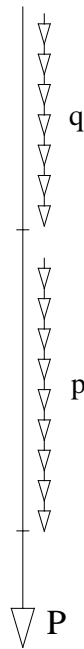


Imagen 4.11. Diagrama de fuerzas de la posición III



Imagen 4.12. Representación de la posición estática III.

4.5. Tablas resumen

De modo reducido, se puede expresar los resultados obtenidos en puntos anteriores a modo de tabla:

	Momento Flector (kg·m)		Momento Torsor (kg·m)	
	Codo	Hombro	Codo	Hombro
Posición I	2,588006	6,773638	-	-
Posición II	2,588006	6,773638	-	2,588006
Posición III	-	-	-	-

Tabla 4.3. Resumen de resultados obtenidos para los momentos máximos.

	Cortante (kg)		Axil (kg)	
	Codo	Hombro	Codo	Hombro
Posición I	6,86	12,5	-	0
Posición II	6,86	12,5	-	-
Posición III	-	-	6,86	12,5

Tabla 4.4. Resumen de los esfuerzos máximos en la estructura.



CAPÍTULO V. DISEÑO EN SOLID EDGE ST2 DEL EXOESQUELETO

5.1. ¿Qué es Solid Edge ST2?

Solid Edge es un programa parametrizado de diseño asistido por computadora de piezas tridimensionales. Permite el modelado de piezas de distintos materiales, doblado de chapas, ensamblaje de conjuntos, soldadura, funciones de dibujo en plano para ingenieros.

5.2. Funcionamiento de Solid Edge ST2

De modo muy simplificado se avanzará en el diseño del exobrazo en Solid Edge ST2. Se explicarán las funciones básicas del programa y cómo se han utilizado para la creación de los distintos sólidos necesarios para el proyecto. Este programa ha sido utilizado para generar la documentación gráfica del proyecto (tanto planos como las imágenes de piezas individuales y conjuntos que aparecen en este capítulo, y que esclarecen más que las imágenes de MSC.ADAMS), así como para la obtención de las características mecánicas de los materiales de construcción gracias a su biblioteca.

5.2.1. Los primeros pasos en Solid Edge

Una vez iniciado el programa obtendremos un menú en el cuál podremos elegir entre otros la creación de un sólido (part) nuevo.

El primer contacto con el modelo es un espacio en el que convergen los tres ejes coordenados clásicos XYZ y los planos que los generan.

Para desplazarse por la pantalla se pulsa “View” en el menú superior. Esto da una serie de opciones de visualización con las que se podrá elegir el mejor modo de atacar el modelo, como se ve en la imagen 5.1.



Imagen 5.1. Ventana “View” de Solid Edge.

A la izquierda se observan las seis vistas clásicas de los ejes (frontal, posterior, superior, inferior, derecha e izquierda). A la derecha (Orient) da opciones de centrado, zoom en un determinado área, rotado con respecto de algún eje, etc. En Style se puede elegir el modo de visualización del sólido (líneas vistas, líneas ocultas, sólido opaco, transparente, ...). A lo largo de este pequeño avance de las características de Solid Edge se obviarán explicaciones debido a la intuitividad de los comandos de este programa.

5.2.2. Modelado de sólidos

Aunque Solid Edge tiene infinidad de comandos de unión de piezas (sólido, chapa, soldadura, doblado, etc) se ha elegido trabajar sólo con sólidos y trabajar con piezas complejas pero que no se compongan de elementos pequeños tales como tornillos, gomas, u otros elementos que se encuentran en distintas máquinas. Debido a que este proyecto se centra en las características mecánicas se reducirá a unos pocos elementos el diseño. En posteriores apartados se hablará de futuros proyectos relacionados, así como de futuras mejoras al modelo.

El primero de ellos cubrirá la distancia del hombro al codo, permitiendo que el brazo pueda adquirir los límites que tendría de no llevar el exoesqueleto puesto. Así mismo se ha eliminado del modelo elementos tales como cables, motores, telas de protección para la piel y otros elementos que se incluirán en aportaciones posteriores al Proyecto Fin de Carrera.

Aunque se mostrará la evolución en el tiempo del modelado se hará un salto desde modelado de piezas sencillas al modelo final obtenido, por tratarse este de operaciones booleanas de sólidos sencillos.

El primer paso para el diseño en Solid Edge es el boceto (Sketch). Una vez abierto Solid Edge se pulsa sobre Sketching, obteniendo el siguiente panel:

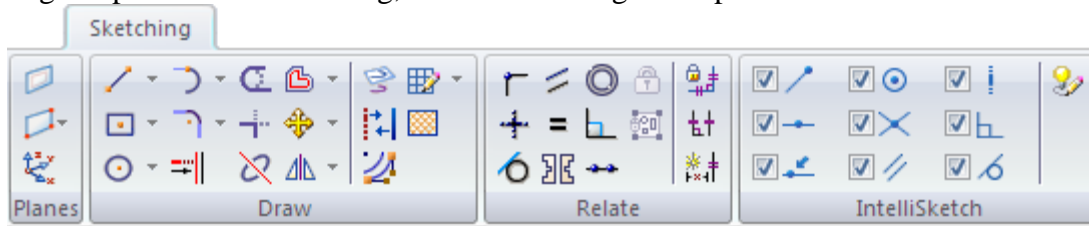


Imagen 5.2. Ventana “Sketching” de Solid Edge.

A la izquierda se puede ver la creación de nuevos planos de trabajo aparte de los tres por defecto para ayudar en la construcción (plano por tres puntos, paralelo a una cara, perpendicular a una línea, etc).

En el comando Draw se tienen comandos de dibujo plano simple tales como rectas, arcos y figuras simples. Además de estas opciones se cuenta con comandos intuitivos de redondeo, eliminación de líneas de corte, alargar, simetrías, etc.

Como se ha comentado este es el primer paso en Solid Edge. Una vez seleccionado una opción de dibujo se procede a seleccionar un plano de trabajo o dibujo, pulsando sobre el candado correspondiente. Esto bloqueará el plano de trabajo.

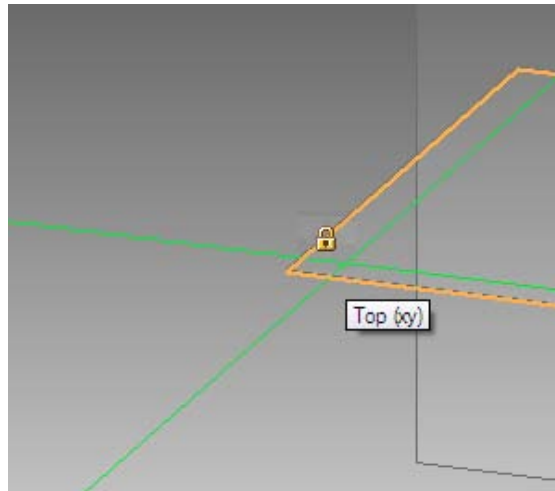


Imagen 5.3. Bloqueo del plano de trabajo.

Ya se tiene elegido un plano de trabajo. Con las opciones de vistas dadas anteriormente se sitúa la cámara para tener una mejor visión de trabajo.

Solid Edge trabaja básicamente con estas tres operaciones:

Extruido

Una vez que se ha creado una figura plana cerrada en uno de los planos se puede extruir tantas unidades como se quiera en perpendicular al plano de dibujo, en una o varios sentidos al mismo tiempo.

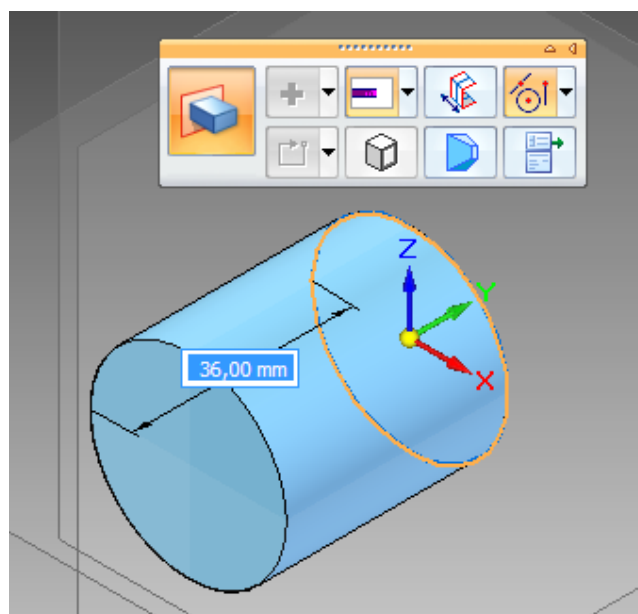


Imagen 5.4. Operación de extruído.

Revolución

Básicamente se trata de hacer lo mismo, pero en este caso habrá que dibujar también un eje de revolución de la figura plana.

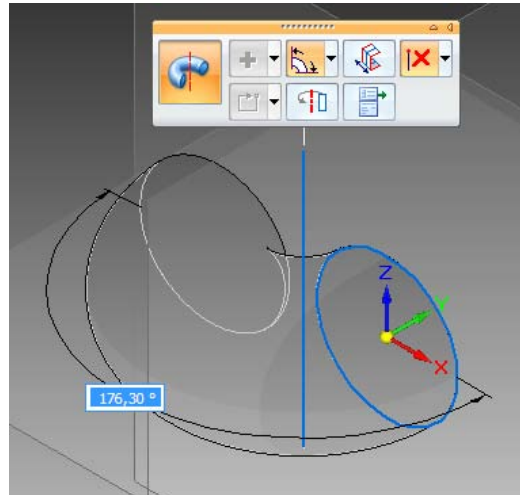


Imagen 5.5. Operación de revolución.

Add > Sweep (Barrido)

Una vez elegido un boceto a lo largo de varios planos se hace un barrido que los englobe a todos mediante una línea que los intersecte.

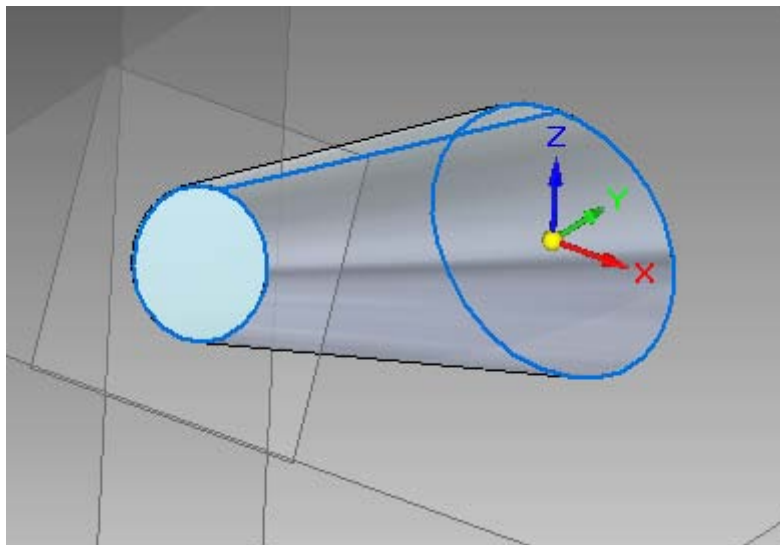


Imagen 5.6. Operación de barrido.

Una vez conocidas las tres operaciones básicas se dan las inversas (borrado por extrusión, por revolución o por barrido). La mayoría de las piezas pueden fabricarse mediante estas seis herramientas, y en este proyecto no se avanzará más al respecto.

5.3. Modelado del Exobrazo

Para el modelo en cuestión se han seguido los siguientes pasos para el modelo final:

5.3.1. Dibujado de los bocetos a utilizar.

Como en cualquier empresa, planificar los pasos previamente a la acción es muy importante. Por ello se han generado los siguientes bocetos:

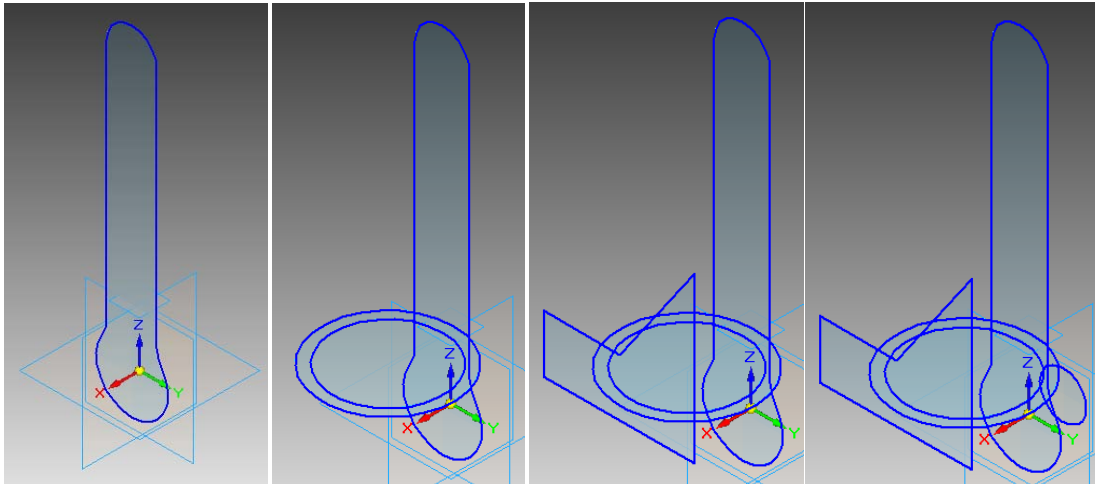


Imagen 5.7. Evolución del dibujado de los bocetos en sus planos.

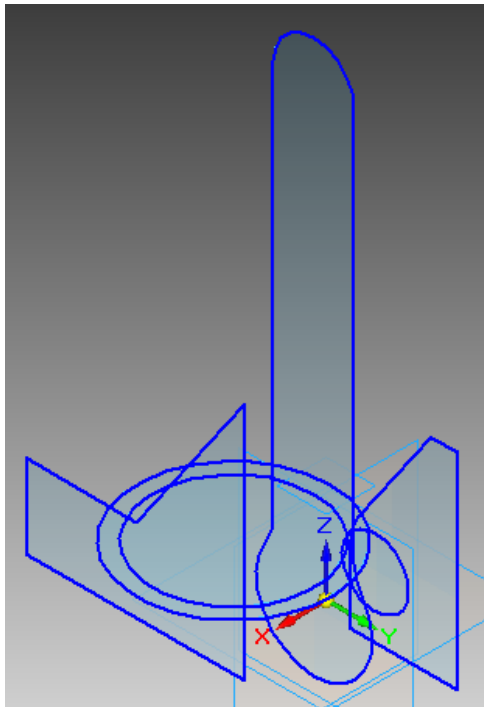


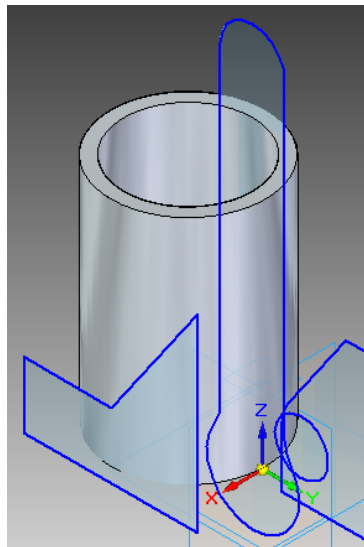
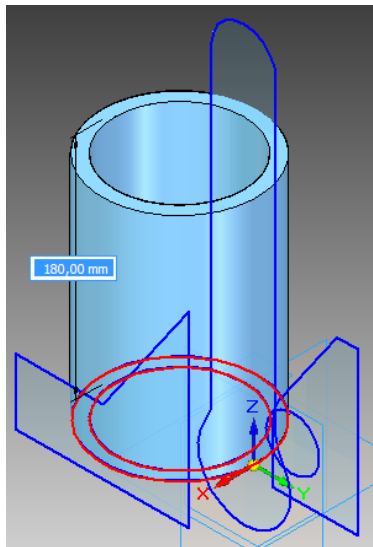
Imagen 5.8. Bocetos de trabajo.

Una vez generados los bocetos en los planos necesarios se procederá a sus modificaciones mediante las operaciones booleanas mencionadas anteriormente.

Se cuenta con cinco bocetos, situados en cinco planos de trabajo distintos.

A cada uno de ellos se le asignará una operación, una dirección y un signo.

5.3.2. Extrusión positiva

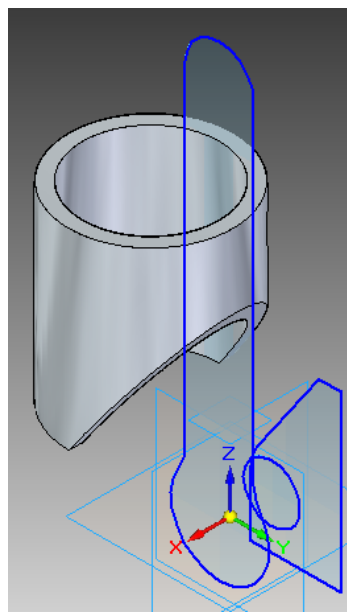
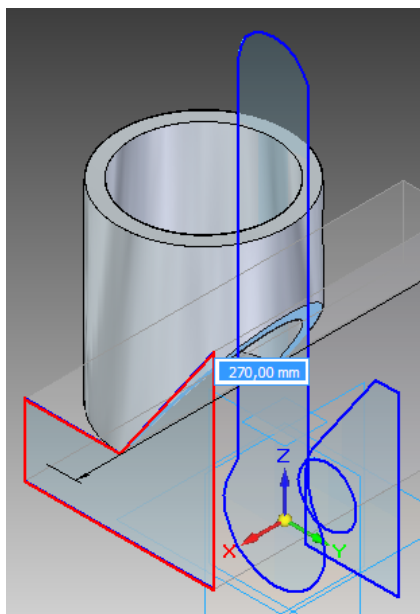


Se extruye según se ve en la imagen uno de los bocetos. En este caso el cilindro de hueco pasante que constituirá la sujeción del brazo del paciente.

Una vez utilizado el boceto, éste pasa a “Bocetos usados”, donde se puede usar de modo indefinido, pero desaparecerá de la pantalla.

Imagen 5.9. Operación y su resultado (a)

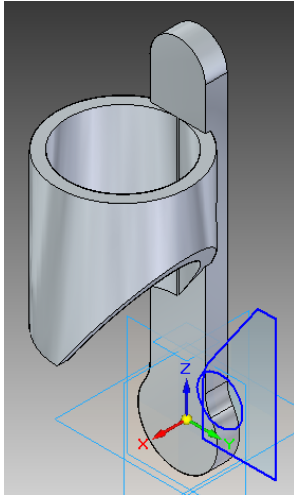
5.3.3. Borrado sección



El siguiente paso realiza un barrido negativo (eliminación de material) a lo largo del sólido anterior. La apertura se realiza para que el brazo pueda doblar sin problemas.

Imagen 5.10. Operación y su resultado (b)

5.3.4. Extruído de la barra vertical



Al igual que en la primera operación, se realizará un extruído que representará la barra vertical que actuará como brazo.

Cuando en Solid Edge se unen dos sólidos en el apartado de confección de piezas, éstas pasan a ser la misma, compartiendo propiedades de material, centro de masas, inercia.

Imagen 5.11. Operación de extruido.

5.3.5. Vaciado por extrusión

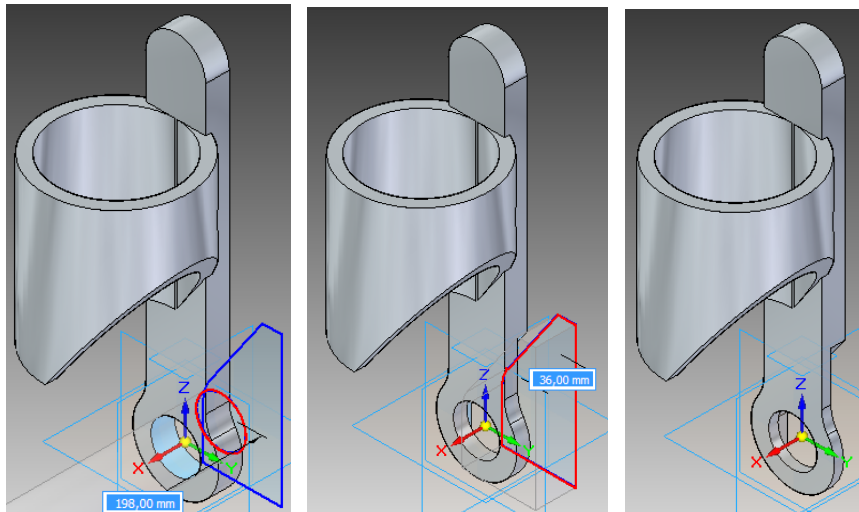
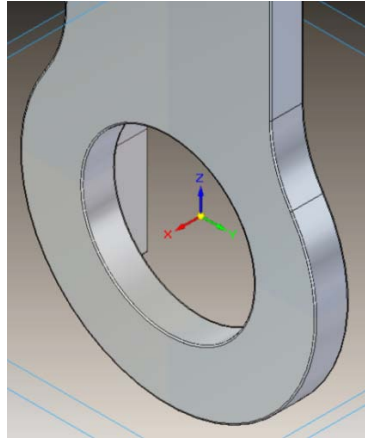
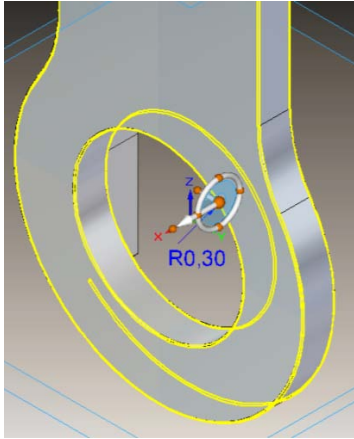


Imagen 5.12. Operaciones y su resultado (c)

En las operaciones de vaciado reflejadas en la imagen 5.12 se elimina el material para dejar hueco al rodamiento y al exoantebrazo.

5.3.6. Redondeado de aristas

El último paso en el modelado de la primera pieza es la del redondeado de las zonas conflictivas de la pieza.

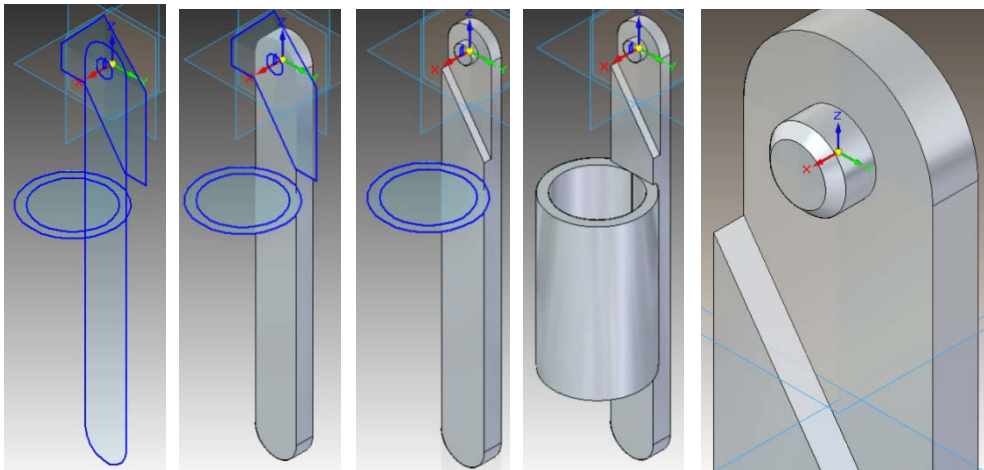


Por ejemplo, el hueco donde el rodamiento será insertado a presión. Se redondearán las aristas para que el rodamiento pueda entrar sin provocar microgrietas que estropeen la pieza.

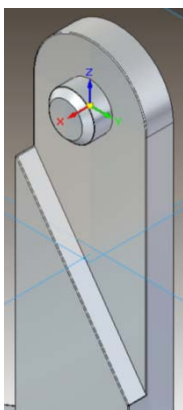
Imagen 5.13. Redondeado de puntos conflictivos.

5.4. Modelado del exoantebrazo

Por tratarse de un modelado bastante simple de comprender, y por contar con documentación gráfica en la que apoyarse este apartado será la sucesión de imágenes captadas para la generación del exoantebrazo, que por analogía es idéntica a la del exobrazo.



Imágenes 5.14-19. Serie de operaciones necesarias para la construcción de la segunda pieza.



Las diferencias radican en que la pieza es más larga, la abrazadera ha sido creada por un solo barrido al ser más simple.

5.5. Rodamiento

Como se ha comentado con anterioridad se ha seleccionado el modelo de rodamiento “16004” de ZKL [24], que corresponde al modelo “16004D” de SKF [25]. Para ver los cálculos justificativos de la elección de este rodamiento ver el Anexo A.

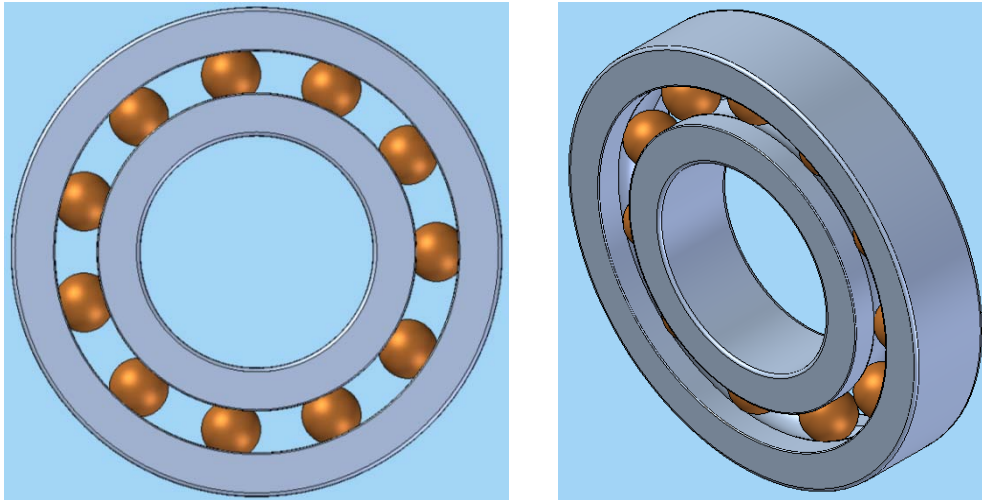


Imagen 5.20. Vista frontal e isométrica del rodamiento elegido.

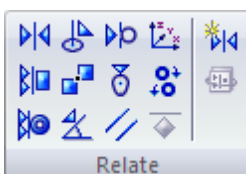
De la página web de SKF se puede obtener directamente un ensamblado en Solid Edge de todos sus rodamientos comerciales. Han sido elegidos dos colores para el diferenciado entre los anillos y los rodamientos internos, pero ambos son el mismo material, mencionado con anterioridad.

5.6. Ensamblado del modelo completo

Una vez que todas las piezas están creadas (exobrazo, exoantebrazo, rodamiento) se puede utilizar el módulo de ensamblaje de Solid Edge. Al arrancar el programa se elige la opción Assembly. Esto da la posibilidad de unir las piezas del modelo y crear relaciones entre ellas.

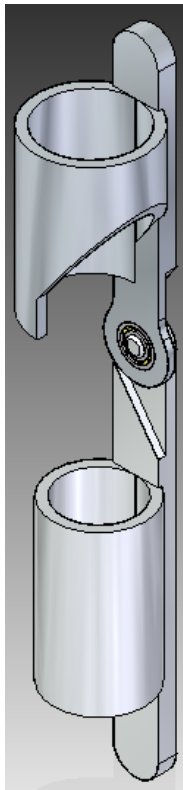
De nuevo aparecerán los tres planos coordinados, y a la izquierda una librería (parts library). Solid ofrece, además de nuestros modelos generados en .part o en parasolid el acceso a una librería normalizada de ejes, tuercas, tornillos, engranajes, vigas, muelles, etc. Se selecciona cualquier pieza y se arrastra a los planos coordinados. Aparecerá en su sistema de referencia original a menos que ya haya un sólido en ese espacio. Al arrastrar la segunda pieza se comprueba que se ha desplazado con respecto a sus ejes originales.

Para unir las piezas del modo en que deberían estar utilizamos las relaciones Relate:



Estas opciones nos permiten centrar caras, alinear ejes, crear relaciones angulares entre piezas, unir puntos, etc.

Imagen 5.21. Vista “Relate” de Solid Edge.



Para el ensamblado de estas piezas se han colocado primero el rodamiento, el hueco pasante del exobrazo y la protuberancia del exoantebrazo. Una vez conseguido esto se crean relaciones entre puntos de caras contenidas en el mismo plano.

Una de las ventajas de modelar los objetos en Solid es, además de lo intuitivo del programa, el hecho de que calcule centros de gravedad y momentos de inercia de modo automático. En Solid, una vez que se ha creado la pieza se pulsa “Inspect > mv Properties”, desplegándose la siguiente ventana:

Imagen 5.22. Ensamblado.

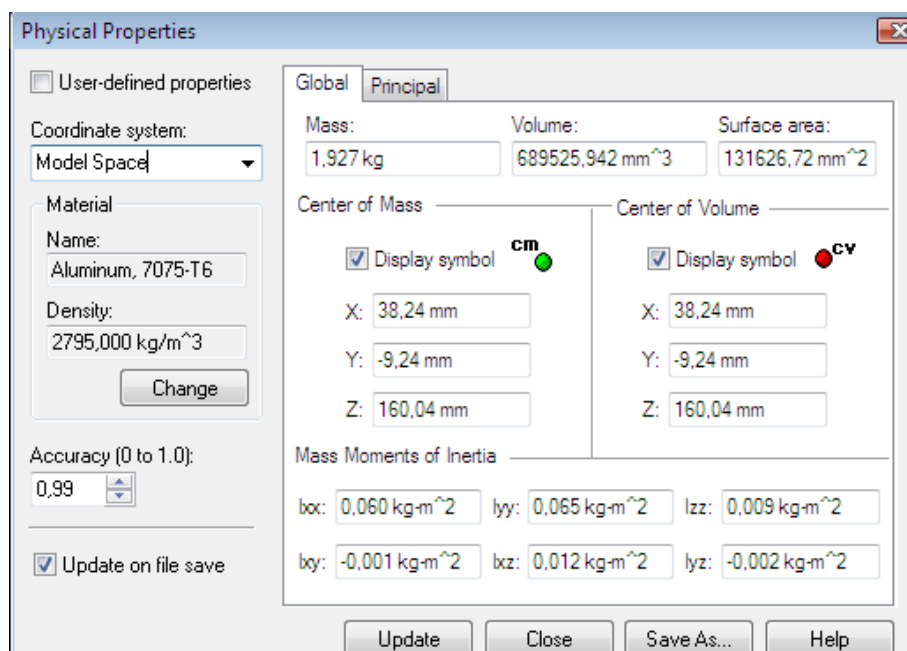


Imagen 5.23. Propiedades físicas del sólido “ExoBrazo”.

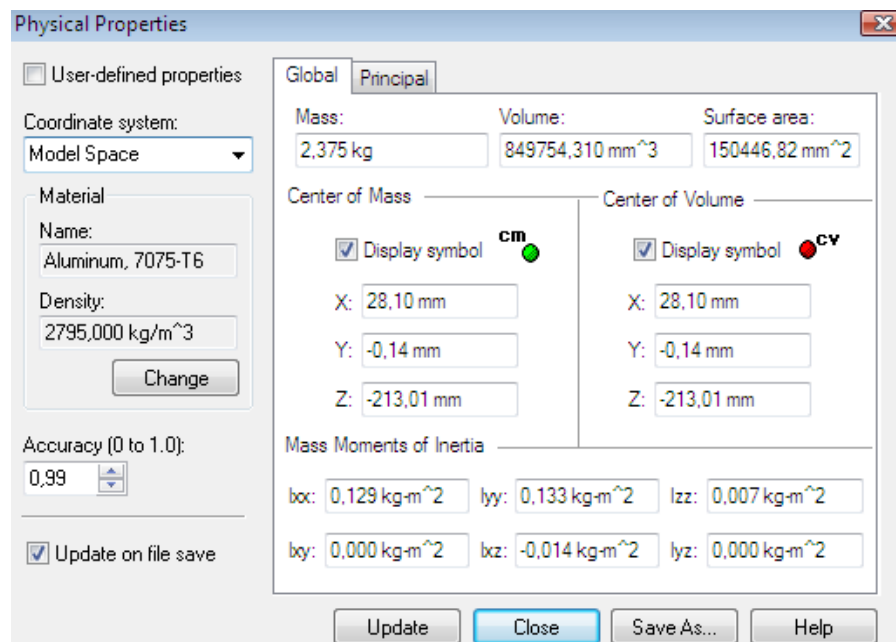


Imagen 5.34. Propiedades físicas del sólido “ExoAntebrazo”

En las imágenes 5.33 y 5.34 se observan las propiedades físicas de las piezas exobrazo y exoantebrazo. Mass Moments of Inertia son los momentos de inercia en kg·m² con respecto de los ejes que pasan por el centro de gravedad de la figura.



CAPÍTULO VI. MODELADO Y SIMULADO EN MSC ADAMS DEL EXOESQUELETO

6.1. ¿Qué es ADAMS?

Es un programa de análisis dinámico de mecanismos creado por MSC SOFTWARE. Se compone de varios módulos que permiten hacer simulaciones del funcionamiento por medio de animaciones, realizar análisis de desplazamientos, vibraciones, realizar análisis de esfuerzos, etc.

Algunos de los módulos más importantes del software son:

Adams/View: Realiza simulaciones de un mecanismo. Es el módulo que se va a utilizar en este proyecto más que ningún otro.

Adams/Solver: Genera los cálculos para la solución de un mecanismo. Es usado por los demás módulos.

Adams/Engine: Simulación de un motor.

Adams/Car: Simulación de la dinámica de un automóvil.

Aunque en un inicio el modelo iba a importarse directamente desde Solid Edge, esto daba conflictos posteriores en la simulación, de modo que se generarán las piezas con las mismas operaciones que con Solid Edge (extrusiones y revoluciones), además de con figuras simples de la biblioteca de MSC.ADAMS.

6.2. Modelado de los sólidos

Mediante los módulos básicos de ADAMS se han generado las siguientes figuras:

Figura	D1 Length [mm]	D2 Radius [mm]	D3 [mm]	Marker [mm]/[°]
(I) Cilindro	180	60	-	0, 58.45, 60 / 180, 90, 180
(II) Cilindro	190	49	-	0, 53.45, 60 / 180, 90, 180
(III) Caja	70	60	140	0, 38.45, -10 / 0, 0, 0
(IV) Caja	110	-130	140	0 98.45, -10 / 0, 0, 55
(V) Cilindro	180	50.7	-	0, -305.61, 50.7 / 180, 90, 180
(VI) Cilindro	200	40.7	-	0, -315.6, 50.7 / 180, 90, 180

Tabla 6.1. Sólidos simples generados en MSC.ADAMS.

Las piezas más complejas, como lo son las barras verticales que sostienen y los anillos del rodamiento han sido generados mediante la extrusión o revolución de varias curvas. Tanto la pieza del brazo han sido extruidas mediante dos perfiles, uno anterior y otro posterior, de 8 y 12 mm, y luego unidos en un solo sólido. Existe una copia digital en la base de datos Biblioteca Rey Pastor (Universidad Carlos III, Escuela Politécnica Superior, para una mejor comprensión de estos datos mediante un programa informático de representado de funciones o puntos.

(VII) Pieza del brazo anterior (extrusión de 12 mm):

-25.0000,79.2899,0.0000,-25.0000,279.0000,0.0000,-23.2233,288.2564,0.0000,-
 15.7468,298.4175,0.0000,7.8766,302.7268,0.0000,0.0000,304.0000,0.0000,6.7876,303.
 0609,0.0000,9.8431,301.9807,0.0000,15.3420,298.7389,0.0000,21.1158,292.3838,0.00
 00,23.5084,287.5061,0.0000,25.0000,279.0000,0.0000,25.0000,37.1118,0.0000,25.118
 0,33.7517,0.0000,26.2472,27.8995,0.0000,27.8976,23.6043,0.0000,29.7408,20.2851,0.
 0000,30.2542,19.5110,0.0000,31.4209,17.5707,0.0000,32.6879,15.0831,0.0000,33.424
 1,13.3728,0.0000,35.0336,8.2854,0.0000,35.8039,3.7520,0.0000,36.0000,0.0000,0.000
 0,35.8460,-3.3264,0.0000,35.5140,-5.8954,0.0000,34.8307,-9.1005,0.0000,33.5560,-
 13.0383,0.0000,32.3848,-15.7234,0.0000,32.0858,-16.3248,0.0000,30.2732,-
 19.4816,0.0000,29.7938,-20.2071,0.0000,29.3456,-20.8527,0.0000,27.8377,-
 22.8268,0.0000,26.6148,-24.2416,0.0000,25.0000,-
 25.9037,0.0000,25.0000,0.0000,0.0000,24.9009,2.2241,0.0000,24.3030,5.8621,0.0000,
 23.2413,9.2109,0.0000,21.6475,12.5055,0.0000,20.4788,14.3394,0.0000,19.0252,16.41
 53,0.0000,-4.5941,50.1472,0.0000

(VIII) Pieza del brazo posterior (extrusión de 8 mm):

-25.0000,79.2899,0.0000,-25.0000,279.0000,0.0000,-23.2233,288.2564,0.0000,-
 15.7468,298.4175,0.0000,-
 7.8766,302.7268,0.0000,0.0000,304.0000,0.0000,6.7876,303.0609,0.0000,9.8431,301.9
 807,0.0000,15.3420,298.7389,0.0000,21.1158,292.3838,0.0000,23.5084,287.5061,0.00
 00,25.0000,279.0000,0.0000,25.0000,37.1118,0.0000,25.1180,33.7517,0.0000,26.2472,
 27.8995,0.0000,27.8976,23.6043,0.0000,29.7408,20.2851,0.0000,30.2542,19.5110,0.00
 00,31.4209,17.5707,0.0000,32.6879,15.0831,0.0000,33.4241,13.3728,0.0000,35.0336,8
 .2854,0.0000,35.8039,3.7520,0.0000,36.0000,0.0000,0.0000,35.8460,-
 3.3264,0.0000,35.5140,-5.8954,0.0000,34.8307,-9.1005,0.0000,33.5560,-
 13.0383,0.0000,32.3848,-15.7234,0.0000,32.0858,-16.3248,0.0000,30.2732,-
 19.4816,0.0000,29.7938,-20.2071,0.0000,29.3456,-20.8527,0.0000,27.8377,-
 22.8268,0.0000,26.6148,-24.2416,0.0000,25.0000,-25.9037,0.0000,22.2096,-
 28.3326,0.0000,17.9294,-31.2176,0.0000,12.0703,-33.9162,0.0000,7.7243,-
 35.1616,0.0000,4.5158,-35.7157,0.0000,0.0000,-36.0000,0.0000,-3.2277,-
 35.8550,0.0000,-7.3937,-35.2326,0.0000,-9.7955,-34.6417,0.0000,-13.6364,-
 33.3174,0.0000,-20.8010,-29.3823,0.0000,-23.6405,-27.1500,0.0000,-28.2641,-
 22.2966,0.0000,-30.0781,-19.7814,0.0000,-33.5111,-13.1532,0.0000,-34.8426,-
 9.0551,0.0000,-35.6415,-5.0678,0.0000,-36.0000,0.0000,0.0000,-
 35.7858,3.9212,0.0000,-35.2702,7.2118,0.0000,-34.1522,11.3853,0.0000,-
 33.1703,13.9904,0.0000,-30.2688,19.5110,0.0000,-28.5395,22.3323,0.0000,-
 26.8832,26.0025,0.0000,-26.2472,27.8995,0.0000,-25.5398,30.7826,0.0000,-
 25.1597,33.3285,0.0000,-25.0000,35.8540,0.0000,-25.0000,56.6681,0.0000

(IX) Hueco de la pieza del brazo (extrusión de 8 mm):

0.0000,21.0000,0.0000,1.8303,20.9201,0.0000,3.6466,20.6810,0.0000,5.4352,20.2844,
 0.0000,7.1824,19.7335,0.0000,8.8750,19.0325,0.0000,10.5000,18.1865,0.0000,12.0744
 ,17.2022,0.0000,13.5278,16.0869,0.0000,14.8492,14.8492,0.0000,16.0869,13.4985,0.0
 00,17.2022,12.0451,0.0000,18.2158,10.5000,0.0000,19.0325,8.8750,0.0000,19.7335,7
 .1824,0.0000,20.2844,5.4352,0.0000,20.6810,3.6466,0.0000,20.9201,1.8303,0.0000,21.
 0000,0.0000,0.0000,20.9201,-1.8303,0.0000,20.6810,-3.6466,0.0000,20.2844,-

5.4352,0.0000,19.7335,-7.1824,0.0000,19.0325,-8.8750,0.0000,18.1865,-
 10.5000,0.0000,17.2022,-12.0451,0.0000,16.0869,-13.4985,0.0000,14.8492,-
 14.8492,0.0000,13.4985,-16.0869,0.0000,12.0451,-17.2022,0.0000,10.5000,-
 18.1865,0.0000,8.8750,-19.0325,0.0000,7.1824,-19.7335,0.0000,5.4352,-
 20.2844,0.0000,3.6466,-20.6810,0.0000,1.8303,-20.9201,0.0000,0.0000,-
 21.0000,0.0000,-1.8303,-20.9201,0.0000,-3.6466,-20.6810,0.0000,-5.4352,-
 20.2844,0.0000,-7.1824,-19.7335,0.0000,-8.8750,-19.0325,0.0000,-10.5000,-
 18.1865,0.0000,-12.0451,-17.2022,0.0000,-13.4985,-16.0869,0.0000,-14.8492,-
 14.8492,0.0000,-16.0869,-13.4985,0.0000,-17.2022,-12.0451,0.0000,-18.1865,-
 10.5000,0.0000,-19.0325,-8.8750,0.0000,-19.7335,-7.1824,0.0000,-20.2844,-
 5.4352,0.0000,-20.6810,-3.6466,0.0000,-20.9201,-1.8303,0.0000,-
 21.0000,0.0000,0.0000,-20.9201,1.8303,0.0000,-20.6810,3.6466,0.0000,-
 20.2844,5.4352,0.0000,-19.7335,7.1824,0.0000,-19.0325,8.8750,0.0000,-
 18.1865,10.5000,0.0000,-17.2022,12.0451,0.0000,-16.0869,13.4985,0.0000,-
 14.8492,14.8492,0.0000,-13.4985,16.0869,0.0000,-12.0451,17.2022,0.0000,-
 10.5000,18.1865,0.0000,-8.8750,19.0325,0.0000,-7.1824,19.7335,0.0000,-
 5.4352,20.2844,0.0000,-3.6466,20.6810,0.0000,-1.8303,20.9201,0.0000

(X) Pieza del antebrazo anterior (extrusión de 8 mm):

25.0000,-98.4741,0.0000,25.0000,-395.0000,0.0000,24.3773,-
 400.5450,0.0000,21.0385,-408.5049,0.0000,12.6330,-416.5733,0.0000,7.6477,-
 418.8015,0.0000,7.6226,-418.8096,0.0000,0.0000,-420.0000,0.0000,-7.6815,-
 418.7906,0.0000,-12.2655,-416.7843,0.0000,-16.0414,-414.1748,0.0000,-21.8136,-
 407.2134,0.0000,-22.9275,-404.9664,0.0000,-25.0000,-395.0000,0.0000,-25.0000,-
 27.0667,0.0000

(XI) Pieza del antebrazo posterior (extrusión de 12 mm):

25.0000,-98.4741,0.0000,25.0000,-395.0000,0.0000,24.3773,-
 400.5450,0.0000,21.0385,-408.5049,0.0000,12.6330,-416.5733,0.0000,7.6477,-
 418.8015,0.0000,7.6226,-418.8096,0.0000,0.0000,-420.0000,0.0000,-7.6815,-
 418.7906,0.0000,-12.2655,-416.7843,0.0000,-16.0414,-414.1748,0.0000,-21.8136,-
 407.2134,0.0000,-22.9275,-404.9664,0.0000,-25.0000,-395.0000,0.0000,-25.0000,-
 27.0667,0.0000,-25.2170,-24.4532,0.0000,-25.2170,0.0000,0.0000,-
 24.6279,4.2973,0.0000,-24.5444,5.7599,0.0000,-23.5295,8.4476,0.0000,-
 22.7205,10.4298,0.0000,-21.7506,12.3252,0.0000,-19.4765,15.6737,0.0000,-
 19.4906,15.6562,0.0000,-17.7033,17.6520,0.0000,-14.8443,20.1158,0.0000,-
 13.2524,21.1985,0.0000,-11.1702,22.3657,0.0000,-8.8678,23.3744,0.0000,-
 5.9444,24.2830,0.0000,-9.3875,23.1705,0.0000,-5.1899,24.4554,0.0000,-
 4.2517,24.6358,0.0000,-
 1.8663,24.9302,0.0000,0.0000,25.0000,0.0000,1.3632,24.9628,0.0000,3.1172,24.8049,
 0.0000,5.2719,24.4378,0.0000,5.6625,24.3503,0.0000,9.6401,23.0666,0.0000,13.1304,
 21.2743,0.0000,15.4284,19.6714,0.0000,17.7028,17.6525,0.0000,19.9844,15.0207,0.00
 00,21.9075,12.0441,0.0000,23.3270,8.9918,0.0000,24.1499,6.4641,0.0000,24.6724,4.0
 340,0.0000,24.8293,2.9168,0.0000,25.0000,0.0000,0.0000

(XII) Hueco del antebrazo (extrusión de 12 mm):

25.0000,-98.4741,0.0000, 25.0000,-395.0000,0.0000, 24.3773,-400.5450,0.0000,
 21.0385,-408.5049,0.0000, 12.6330,-416.5733,0.0000, 7.6477,-418.8015,0.0000,
 7.6226,-418.8096,0.0000, 0.0000,-420.0000,0.0000, -7.6815,-418.7906,0.0000, -
 12.2655,-416.7843,0.0000, -16.0414,-414.1748,0.0000, -21.8136,-407.2134,0.0000, -
 22.9275,-404.9664,0.0000, -25.0000,-395.0000,0.0000, -25.0000,-27.0667,0.0000

Las operaciones booleanas sobre estas figuras han generado las dos sujeciones para los brazos:

(XIII) Sujeción para el brazo: I-II-III-IV

(XIV) Sujeción para el antebrazo: V-VI

(XV) Pieza completa longitudinal del brazo: VII+VIII-IX

(XVI) Pieza completa longitudinal del antebrazo: X+XI-XII

Además de estas figuras se ha generado el rodamiento (que se divide en anillo exterior, interior y esferas.

(XVII) Anillo interior:

0.0, 13.5499, 12.0, 0.0, 13.5799, 12.0046, 0.0, 13.5996, 12.0132, 0.0, 13.6117, 12.0214,
 0.0, 13.6206, 12.0293, 0.0, 13.6341, 12.046, 0.0, 13.6399, 12.0563, 0.0, 13.6463,
 12.0733, 0.0, 13.6493, 12.0893, 0.0, 13.6499, 12.1, 0.0, 13.6499, 14.2146, 0.0, 13.6289,
 14.2354, 0.0, 13.5949, 14.2703, 0.0, 13.5632, 14.3039, 0.0, 13.5333, 14.3369, 0.0,
 13.5133, 14.3597, 0.0, 13.4999, 14.3752, 0.0, 13.4801, 14.3987, 0.0, 13.4516, 14.4334,
 0.0, 13.4193, 14.4744, 0.0, 13.3864, 14.5181, 0.0, 13.3596, 14.5553, 0.0, 13.3167,
 14.6178, 0.0, 13.2818, 14.6719, 0.0, 13.2411, 14.7392, 0.0, 13.2027, 14.8073, 0.0,
 13.1645, 14.8806, 0.0, 13.1237, 14.966, 0.0, 13.095, 15.0317, 0.0, 13.0707, 15.0918,
 0.0, 13.0337, 15.1931, 0.0, 13.0098, 15.2669, 0.0, 12.988, 15.3422, 0.0, 12.9685,
 15.4185, 0.0, 12.9498, 15.5031, 0.0, 12.9321, 15.5998, 0.0, 12.9184, 15.6968, 0.0,
 12.9095, 15.7817, 0.0, 12.9034, 15.8674, 0.0, 12.9004, 15.9506, 0.0, 12.8999, 16.0, 0.0,
 12.9004, 16.0475, 0.0, 12.9046, 16.1525, 0.0, 12.9093, 16.2169, 0.0, 12.9191, 16.3094,
 0.0, 12.9361, 16.424, 0.0, 12.9566, 16.5293, 0.0, 12.9781, 16.6204, 0.0, 12.9991,
 16.6974, 0.0, 13.0226, 16.7736, 0.0, 13.0583, 16.8757, 0.0, 13.095, 16.9682, 0.0,
 13.1112, 17.0059, 0.0, 13.1354, 17.0592, 0.0, 13.1592, 17.1087, 0.0, 13.1916, 17.1719,
 0.0, 13.2318, 17.2447, 0.0, 13.2804, 17.3258, 0.0, 13.3258, 17.3957, 0.0, 13.3821,
 17.476, 0.0, 13.4486, 17.5628, 0.0, 13.4999, 17.6248, 0.0, 13.5369, 17.6671, 0.0,
 13.588, 17.7224, 0.0, 13.6499, 17.7853, 0.0, 13.6499, 19.9, 0.0, 13.6476, 19.9211, 0.0,
 13.6431, 19.9362, 0.0, 13.637, 19.9491, 0.0, 13.6313, 19.9581, 0.0, 13.6206, 19.9707,
 0.0, 13.6141, 19.9766, 0.0, 13.6074, 19.9818, 0.0, 13.6018, 19.9855, 0.0, 13.5962,
 19.9886, 0.0, 13.5877, 19.9926, 0.0, 13.5758, 19.9966, 0.0, 13.568, 19.9983, 0.0,
 13.5622, 19.9992, 0.0, 13.5562, 19.9998, 0.0, 13.5499, 20.0, 0.0, 10.2999, 20.0, 0.0,
 10.2675, 19.9982, 0.0, 10.253, 19.9963, 0.0, 10.2416, 19.9943, 0.0, 10.2289, 19.9915,
 0.0, 10.2191, 19.9889, 0.0, 10.209, 19.9859, 0.0, 10.1972, 19.9819, 0.0, 10.1848,
 19.977, 0.0, 10.1722, 19.9715, 0.0, 10.1584, 19.9645, 0.0, 10.146, 19.9575, 0.0, 10.134,
 19.9499, 0.0, 10.1199, 19.94, 0.0, 10.1007, 19.9243, 0.0, 10.0836, 19.9078, 0.0,

10.0665, 19.8885, 0.0, 10.0535, 19.8711, 0.0, 10.0397, 19.8492, 0.0, 10.0297, 19.8303, 0.0, 10.0204, 19.8089, 0.0, 10.011, 19.7807, 0.0, 10.0039, 19.7486, 0.0, 10.0001, 19.7113, 0.0, 9.9999, 19.7, 0.0, 9.9999, 12.3, 0.0, 10.0016, 12.2679, 0.0, 10.0046, 12.247, 0.0, 10.0099, 12.2234, 0.0, 10.016, 12.2029, 0.0, 10.025, 12.1799, 0.0, 10.0351, 12.1591, 0.0, 10.044, 12.1434, 0.0, 10.059, 12.1212, 0.0, 10.0702, 12.107, 0.0, 10.0878, 12.0879, 0.0, 10.1047, 12.0722, 0.0, 10.1181, 12.0614, 0.0, 10.1316, 12.0516, 0.0, 10.1501, 12.0401, 0.0, 10.1661, 12.0315, 0.0, 10.1839, 12.0233, 0.0, 10.2016, 12.0165, 0.0, 10.2185, 12.0112, 0.0, 10.2364, 12.0068, 0.0, 10.2546, 12.0034, 0.0, 10.2741, 12.0011, 0.0, 10.2999, 12.0

(XVIII) Anillo exterior

0.0, 17.4, 12.0, 0.0, 20.7, 12.0, 0.0, 20.8171, 12.0238, 0.0, 20.8686, 12.0518, 0.0, 20.9121, 12.0879, 0.0, 20.97, 12.1693, 0.0, 20.9802, 12.1927, 0.0, 21.0, 12.3, 0.0, 21.0, 19.7, 0.0, 20.9887, 19.7816, 0.0, 20.9676, 19.8357, 0.0, 20.9121, 19.9121, 0.0, 20.8749, 19.9438, 0.0, 20.8257, 19.9724, 0.0, 20.7, 20.0, 0.0, 17.4, 20.0, 0.0, 17.3693, 19.9952, 0.0, 17.342, 19.9815, 0.0, 17.3293, 19.9707, 0.0, 17.3197, 19.9596, 0.0, 17.305, 19.9312, 0.0, 17.3, 19.9, 0.0, 17.3, 17.6248, 0.0, 17.3472, 17.5679, 0.0, 17.413, 17.4825, 0.0, 17.4892, 17.3731, 0.0, 17.5576, 17.2629, 0.0, 17.6464, 17.0972, 0.0, 17.7027, 16.9735, 0.0, 17.7742, 16.7831, 0.0, 17.8252, 16.6069, 0.0, 17.8552, 16.4709, 0.0, 17.8755, 16.3493, 0.0, 17.8913, 16.2087, 0.0, 17.9, 16.0, 0.0, 17.8962, 15.8613, 0.0, 17.8854, 15.7301, 0.0, 17.8703, 15.6161, 0.0, 17.8347, 15.4325, 0.0, 17.7452, 15.134, 0.0, 17.6771, 14.968, 0.0, 17.5783, 14.7731, 0.0, 17.488, 14.6251, 0.0, 17.4279, 14.538, 0.0, 17.3735, 14.4653, 0.0, 17.3, 14.3752, 0.0, 17.3, 12.1, 0.0, 17.3053, 12.0679, 0.0, 17.3193, 12.041, 0.0, 17.3293, 12.0293, 0.0, 17.3417, 12.0188, 0.0, 17.3693, 12.0048

Realizando operaciones booleanas entre ellas y con extrusiones de bocetos se obtienen las siguientes figuras:

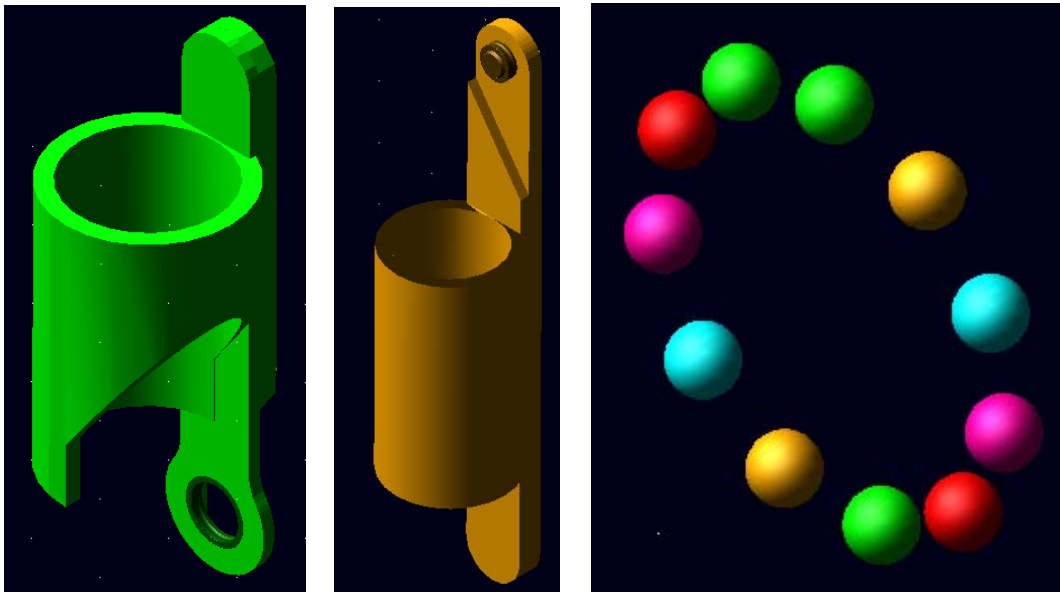


Imagen 6.1. Vista de las figuras generadas en ADAMS. Exobrazo y anillo exterior, exoantebrazo y anillo interior, y esferas de rodamiento.

Como se puede apreciar en la figura, por motivos de simplicidad de cálculo se ha introducido el rodamiento en las dos piezas principales, generándolos como volúmenes solidarios.

Las dimensiones del rodamiento han sido obtenidas del catálogo online del fabricante SKF [25] y del catálogo online del fabricante ZKL Group [24].

6.3. Puntos característicos del modelo.

Se procederá ahora a situar los puntos característicos del modelo. Estos serán:

Antebrazo:

- MARKER_22: situado en el extremo del antebrazo, simulará la mano;
- MARKER_7: situado en el inicio del antebrazo, simulará el codo;

Brazo:

- MARKER_3: situado en el extremo del brazo, simulará el codo;
- MARKER_21: situado en el inicio del brazo, simulará el hombro;

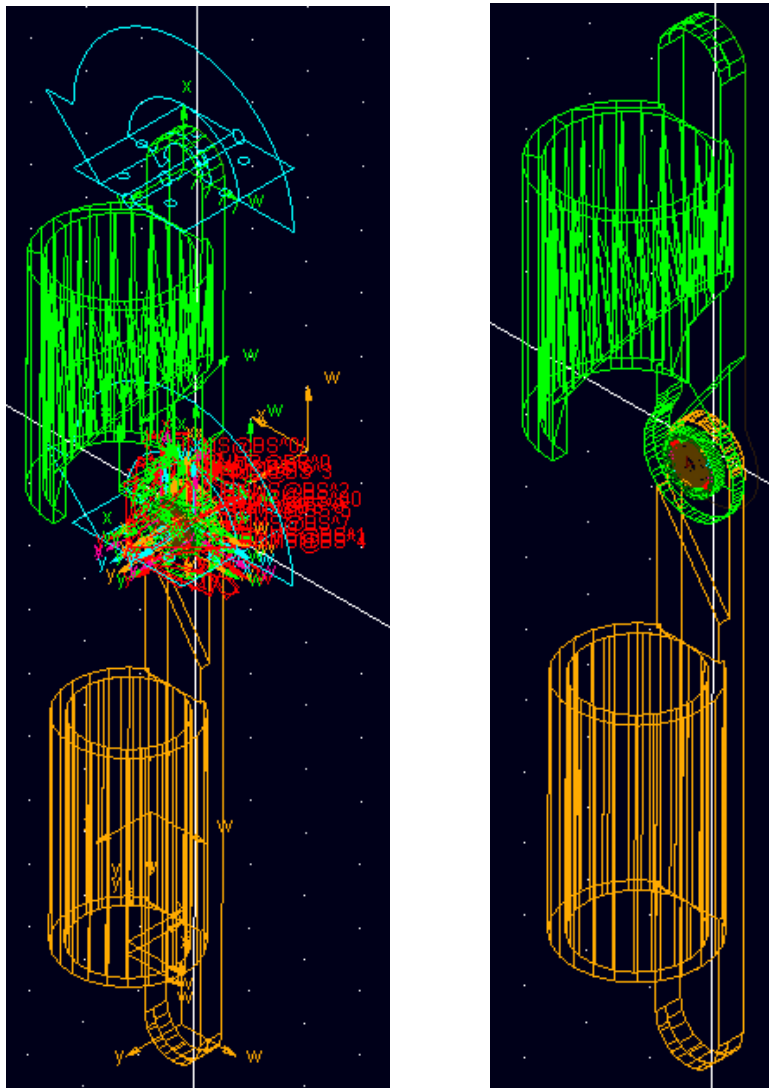


Imagen 6.2. Exoesqueleto modelado.

En la imagen de la izquierda aparecen los distintos markers, juntas, esfuerzos y puntos de contacto entre objetos, mientras que en la figura de la derecha se observa un ensamblado sin referencias.

6.4. Creación de controladores

En este apartado se crean las variables que van a describir el movimiento. Cobrará más relevancia en el próximo capítulo, junto con la interacción entre el programa director y el guiado. Para ello se sigue los siguientes pasos: Build > System Elements > State Variable > New...

Se abrirá el panel desplegable de la imagen 6.3:

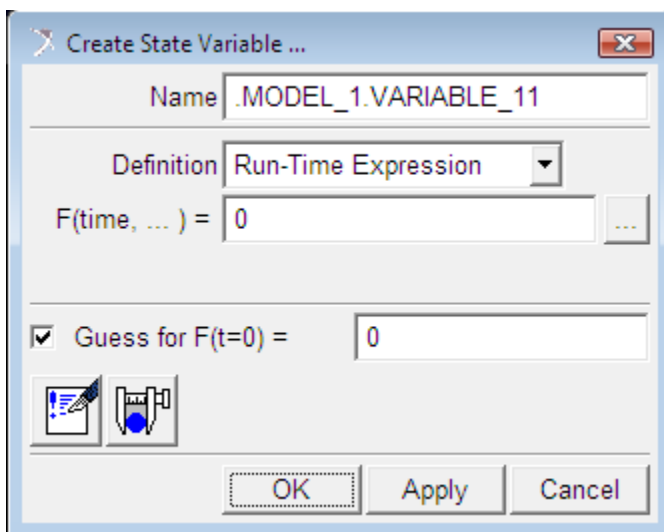


Imagen 6.3. Panel de variables del sistema.

En “nombre” se puede introducir cualquier valor. No obstante no es así en “F(time,...)”. En él se introduce la referencia a la que hace uso nuestra variable. Por ejemplo, si se trata de una variable dependiente que señala la posición en X de un determinado punto (MARKER_1, por ejemplo), se introduce:

DX(MARKER_1)

En tabla 6.2 se introducen las variables utilizadas, y una breve descripción.

NOMBRE VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
DX4	Dependiente	DX(MARKER_4)	Control de la posición en X del MARKER_4
DY4	Dependiente	DY(MARKER_4)	Control de la posición en Y del MARKER_4
DX19	Dependiente	DX(MARKER_19)	Control de la posición en X del MARKER_19
DY19	Dependiente	DY(MARKER_19)	Control de la posición en Y del MARKER_19
AZ12	Dependiente	AZ(MARKER_12)	Control de la posición angular en Z del MARKER_12
AZ16	Dependiente	AZ(MARKER_16)	Control de la posición angular en Z del MARKER_16
WZ12	Dependiente	WZ(MARKER_12)	Control de la velocidad angular en Z del MARKER_12
WZ16	Dependiente	WZ MARKER_16)	Control de la velocidad angular del MARKER_16
W1	Independiente	-	Velocidad angular del sólido “brazo”
W2	Independiente	-	Velocidad angular del sólido “antebrazo”

Tabla 6.2. Declaración de variables en Adams.

Mediante estos puntos se va a poder controlar el movimiento del brazo y descargar las gráficas una vez analizadas.

Las variables dependientes ayudarán a corregir el modelo, y las independientes darán movimiento. Más adelante se explicará a fondo el control de W1 y W2.

6.5. Coacciones, contornos y relaciones entre piezas.

Hasta ahora el modelo en Adams tiene trece piezas, a las que llamaré por su nombre en el programa, aunque parezca algo arbitrario. Hay que mencionar que Adams va numerando los sólidos uno a uno según van siendo creados. Si se genera un cubo y luego una esfera constituirán las PART_1 y PART_2. Si ahora realizamos una operación booleana de suma ambos pasarán a llamarse PART_1, dejando el nombre PART_2 de nuevo libre para la siguiente pieza.

NOMBRE	OBJETO
PART_12	Sólido que simula el exobrazo (incluida la sujeción del brazo). Se ha incluido el anillo exterior del rodamiento, por tratarse de una unión solidaria.
PART_15	Sólido que simula el exoantebrazo (incluida la sujeción del antebrazo). Se ha incluido el anillo interior del rodamiento, por tratarse de una unión solidaria.
PART_21-31	Rodamientos esféricos.

Tabla 6.3. Sólidos que componen el modelo en Adams.

Las medidas correspondientes se encuentran en la documentación gráfica adjunta deñ Anexo E.

Una vez que se han modelado los sólidos y se han asignado las variables que controlarán el movimiento comienza la fase de creación de relaciones entre sólidos. De este modo se le dice al programa cómo tienen que comportarse unos sólidos con respecto a otros.

Por defecto Adams no genera ninguna interacción entre sólidos, de modo que si se realiza una simulación todos los sólidos que haya en la ventana “caerán” hacia abajo con la misma aceleración, atravesándose unos a otros al girar.

Es por ello que se seleccionará “Contact”:



Esto despliega un panel en el que seleccionan los sólidos dos a dos, y se modela la interacción que tendrán entre ellos.

Se ha optado por los siguientes valores para el rozamiento entre esferas y anillos:

Static Coefficient: 6.1E-002

Dynamic Coefficient: 3.2E-002

Stiction Transition Vel: 5.0E-002

Friction Transition Vel: 1.0

Los valores han sido obtenidos del manual “FAG Lubricación de Rodamientos REV.3” [27].

Se tiene ahora el modelo completo en MSC.ADAMS. En el siguiente apartado se ver el programa que dirigirá a MSC.ADAMS en sus cálculos: MATLAB; así como el método de cálculo elegido y su justificación.



CAPÍTULO VII. SIMULACIÓN EN MSC.ADAMS MEDIANTE MOTOR MATLAB

7.1 ¿Qué es MATLAB?

MATLAB © (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices"), figura es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X. [30]

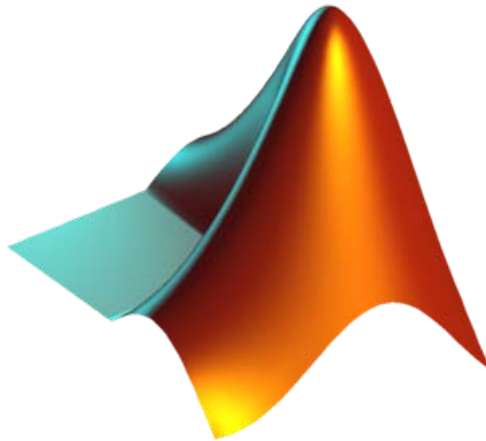


Imagen 7.1. Logotipo de MATLAB

Fue creado por Cleve Moler en 1984, surgiendo la primera versión con la idea de emplear paquetes de subrutinas escritas en Fortran en los cursos de álgebra lineal y análisis numérico, sin necesidad de escribir programas en dicho lenguaje.

El lenguaje de programación M fue creado en 1970 para proporcionar un sencillo acceso al software de matrices LINPACK y EISPACK sin tener que usar Fortran.

En 2004, se estimaba que MATLAB era empleado por más de un millón de personas en ámbitos académicos y empresariales.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, que son Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI).

Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

MATLAB es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.

7.2 Últimos pasos en MSC.ADAMS. Exportado.

En este apartado del proyecto se seguirán una serie de instrucciones para poder controlar y monitorizar las variables del programa MSC.ADAMS. Se ha elegido Matlab por su versatilidad, alta potencia y rendimiento frente al cálculo en ADAMS, además de tener un sistema de representación más intuitivo.

Para ello se tendrá que configurar tanto el programa ADAMS como Matlab para que trabajen juntos.

7.2.1 Configuraciones en Adams

Hay que tener en cuenta que esta sección del proyecto hay que llevarla a cabo una vez que nuestra modelización esté terminada, ya que de modificar el modelo es posible que se pierda esta información o que nos de algún tipo de error posterior.

Una vez iniciado MATLAB se tendrá que configurar un plugin para trabajar con ADAMS. No es necesaria la instalación de ningún archivo externo, la información ya viene implementada con la instalación completa, pero por algún motivo viene sin activar.

En la pestaña “Tools” se pulsa sobre “Plugin Manager...”, y en el panel desplegable que aparece a continuación se chequea “Adams/Controls” (las dos casillas). Esto dará la posibilidad a ambos programas de intercambiar información.

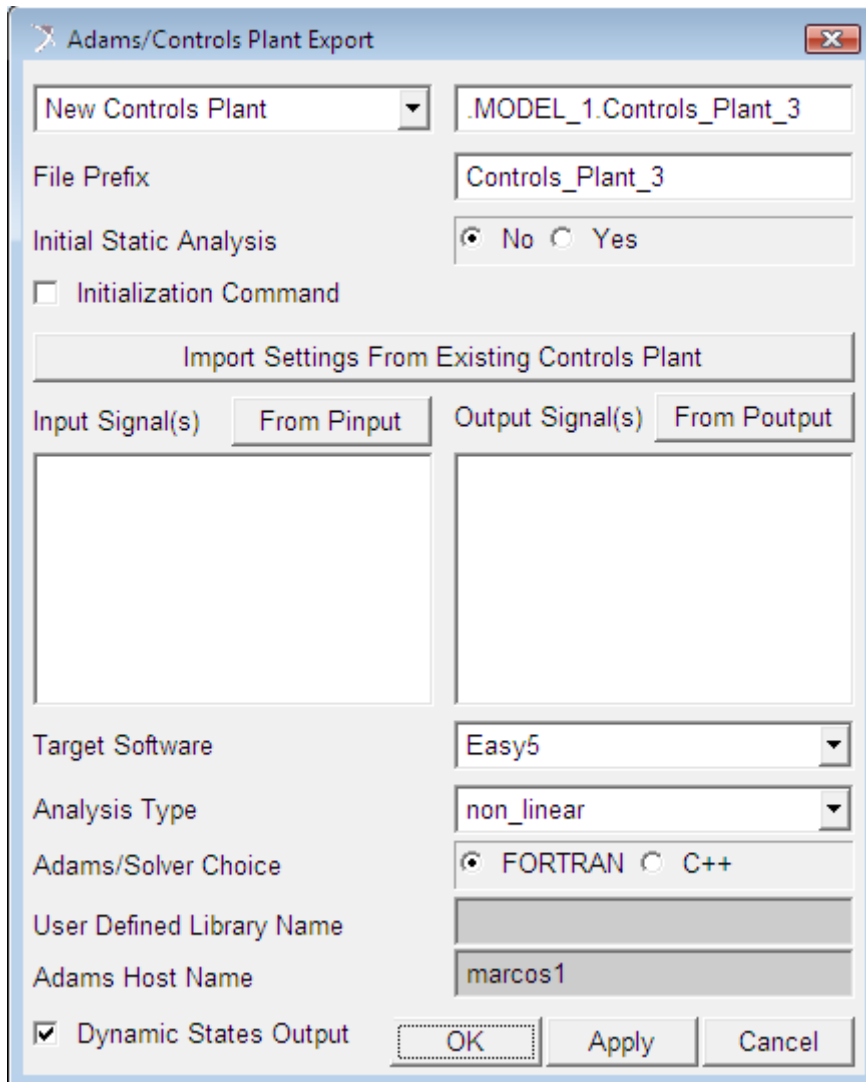
Lo restante que se hará en Adams será configurar el programa mediante una serie de instrucciones básicas que se verán a continuación. Es importante remarcar que estos cambios han de hacerse una vez el modelo esté completo (modelado, puntos clave, propiedades físicas, restricciones entre cuerpos, etc...).

7.2.2 Exportación de información desde MSC.ADAMS

Una vez generado un modelo sólidamente viable (sólidos que no se intersectan, gravedad correcta, relaciones entre piezas secantes, etc...) se procede a exportar un plan de trabajo para MATLAB.

Se selecciona “Controls > Plant Export”.

Esta acción nos despliega el siguiente panel:

**Imagen 7.2. Plant Export**

Es importante mencionar que MSC.ADAMS no permite la sobrescritura del archivo “Controls_Plant_X.m”, que es el que se genera tras guardar en esa vista. La “X” indica el número de plan. Por lo tanto, si ya existe un archivo “Controls_Plant_1” es recomendable no editarlo, y pasar directamente a trabajar en otro directorio. Esto evitará problemas de cálculo posteriores, en el que las referencias de dos planes pueden cruzarse y sobrescribirse de no tener un orden.

Una vez abierta la ventana se hace doble click sobre el tablero blanco bajo “Input Signal(s)”. Esto llevará a un segundo desplegable, en el que se verán las variables de control que se han editado en el capítulo anterior. En principio el número de variables es ilimitado, y bastará una por cada grado de libertad del modelo. Se seleccionarán las variables independientes de control.

En “Output Signal(s)” se elegirán aquellas variables dependientes con las que queremos monitorizar el proceso. Aplican las mismas normas que en el apartado anterior.

Para la resolución de este proyecto se ha seleccionado en “Target Software” el programa MATLAB. El resto de campos queda por defecto. Una vez seleccionado “OK” se crearán varios archivos en la carpeta que contiene el modelo.

Aunque ya se ha mencionado es importante seleccionar un directorio previamente al guardado o exportación de cualquier tipo, ya que la ruta por defecto para MSC.ADAMS se encuentra en “system 32”.

7.3 Inicio de MATLAB

Los siguientes pasos han de hacerse sin cerrar la ventana de MSC.ADAMS.

Al abrir el programa MATLAB se abre el menú principal, compuesto por una serie de módulos entre los que se incluyen un editor de texto y una barra de directorio.

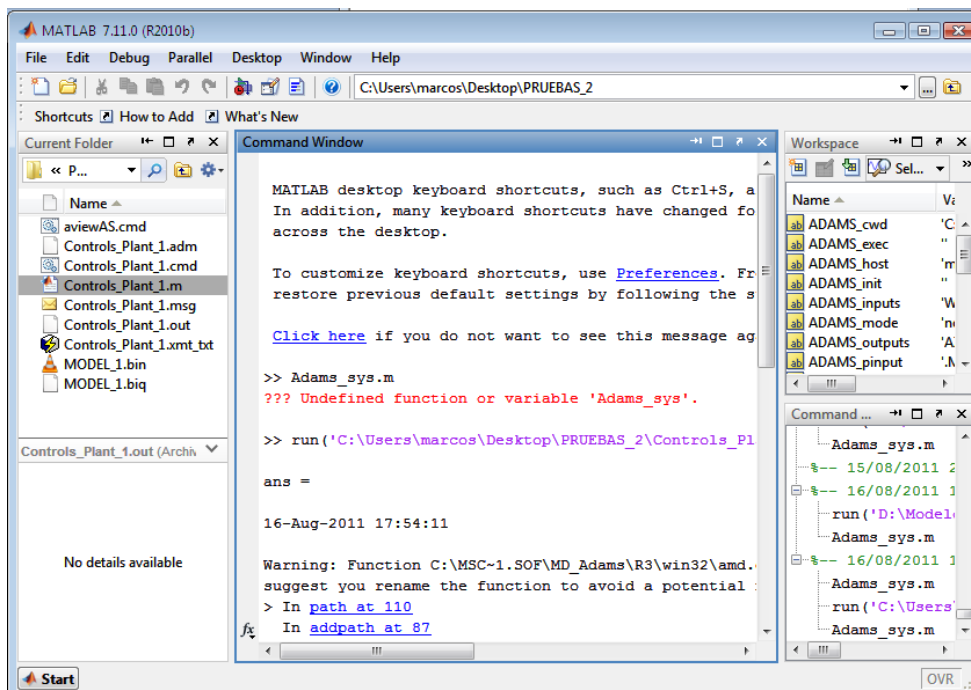


Imagen 7.3. Inicio de MATLAB

Aunque MATLAB tiene una infinidad de características simplemente en el panel principal no se utilizarán, al quedar fuera del rango del proyecto.

Para cargar el archivo .m exportado desde MSC.ADAMS se introduce en la barra de direcciones la ruta de guardado del archivo de control exportado y se presiona enter. Tras un parpadeo MATLAB se ha “posicionado” sobre la carpeta de trabajo.

Se introduce el comando “Controls_Plant_X.m”. Esto carga el archivo que hace interaccionar a MATLAB y MSC.ADAMS.

Se introduce después el comando “Adams_sys.m”, que se trata un archivo creado por defecto. Este comando despliega un panel gráfico en el que mediante módulos operacionales se generará un modelo de cálculo. (Tarda unos segundos en cargar). Se ha

elegido un modo gráfico de diseño por ser más intuitivo que una secuencia de comandos. De este modo detectar un fallo de programación es más obvio.

Se despliega el siguiente panel:

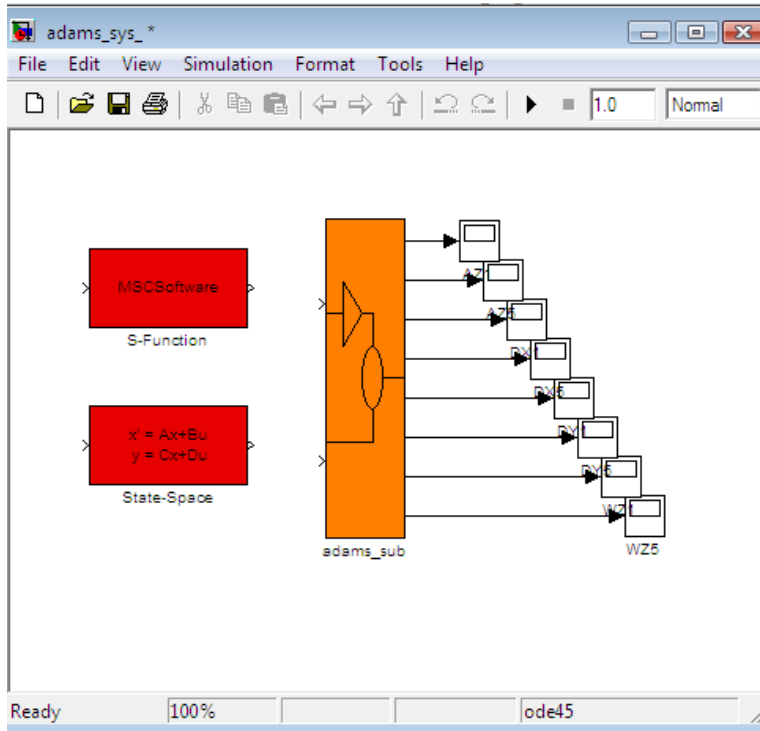


Imagen 7.4. Adams_sys.m

En él se observan tres módulos principales, y unos cuantos módulos satélites:

- dos módulos de color rojo,
- un módulo naranja, es el “Bloque de Cálculo” cuya función se describirá posteriormente;
- “scope’s” de las salidas de las variables dependientes.

El bloque State Space contiene las ecuaciones en el espacio de estados que definen el comportamiento del sistema. Es una forma de definir los sistemas físicos mediante transformadas de matrices. La S-Function contiene la misma información, pero en código de Matlab.

Se selecciona “File > New model...”, lo que creará otra ventana (será el espacio de trabajo para diseñar el diagrama). Se seleccionan el módulo naranja y los planetarios (así como sus interacciones) y se sueltan sobre el nuevo modelo.

Para ver más módulos con los que crear el programa se selecciona: View > Library Browser”. Esto despliega una biblioteca de módulos que se explicarán en el siguiente apartado.

7.4 Módulos de MATLAB en Adams sys

Al abrirse el desplegable de la biblioteca de módulos aparece un listado en el que se clasifican los módulos según uso y naturaleza. Para este proyecto se utilizan módulos relativamente simples, y un par de módulos complejos. Estos son los bloques utilizados, no merece la pena hablar de los otros cientos que existen, así como sus combinaciones.

4.4.1 Bloque de cálculo de MATLAB



Se trata del bloque naranja mencionado con anterioridad. Este bloque se encarga de interactuar con el programa MSC.ADAMS desde MATLAB, creando un diálogo constante. El proceso es el siguiente, que ocurre en fracciones de tiempo de milisegundos:

- entra una señal en el bloque,
- ésta es leída por MSC.ADAMS, que genera un movimiento, así como unas reacciones a éste tanto en el sólido al que ataíne el movimiento como en todos aquellos que se vean perturbados por su movimiento,
- las señales de los markers son devueltas al programa MATLAB,
- estas señales se pueden obtener de forma gráfica, como se verá a continuación.

Este bloque se genera automáticamente mediante el modelo de “Controls_Plant” importado. Tendrá tantas entradas como variables independientes, y tantas salidas como variables dependientes.

4.4.2 PID

Se trata del bloque más completo que se utilizará en el proyecto.

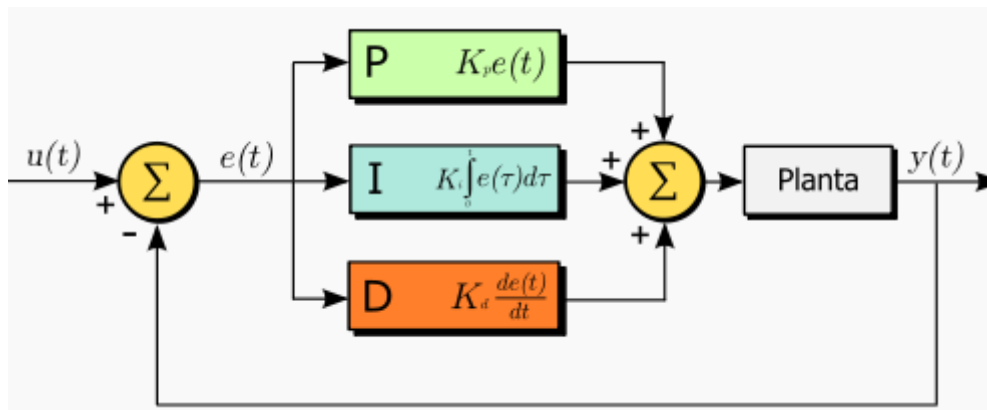


Imagen 7.5. Esquema básico del controlador PID.

Mediante el control PID se pretende simular las variaciones en velocidad del motor del codo, con lo que habrá que buscar unos valores de P, I y D que no solo den una señal adecuada al movimiento normal del codo, sino que sean realistas de acuerdo a los movimientos del motor. Los diagramas unifilares han sido recogidos en el Anexo E de este documento.



CAPÍTULO VIII. CÁLCULO DEL MODELO EN SITUACIONES COTIDIANAS

8.1. Introducción

En este capítulo se va a condensar toda la información relevante del proyecto. Van a convergir los conocimientos de biomecánica a la hora de determinar un movimiento para el modelo; los de programación, para lograr una optimización en el ajuste del movimiento; diseño del exobrazo, con sus características que afectarán al movimiento (masas, centros de inercia, velocidades); características del rodamiento, que harán que este se comporte de un modo realista y fluido, etc.

Se darán una serie de movimientos corrientes del brazo humano para, una vez parametrizados, utilizarlos en el cálculo de las características del motor.

Esta memoria ha sido redactada una vez obtenidos los resultados finales de las simulaciones, por lo que no avanzará en orden cronológico, esto es, no avanzarán en el orden en que han sido generados. Hay que decir que el modelo final (Modelo X) del proyecto ha sido diseñado de acuerdo al motor elegido.

8.2. Movimientos característicos

Se han elegido los siguientes movimientos para definir las características del motor necesario para las simulaciones. El motivo principal ha sido la cotidianidad de ellos,. Para la explicación de las simulaciones se tendrá en cuenta el siguiente sistema de referencia, ya mencionado:

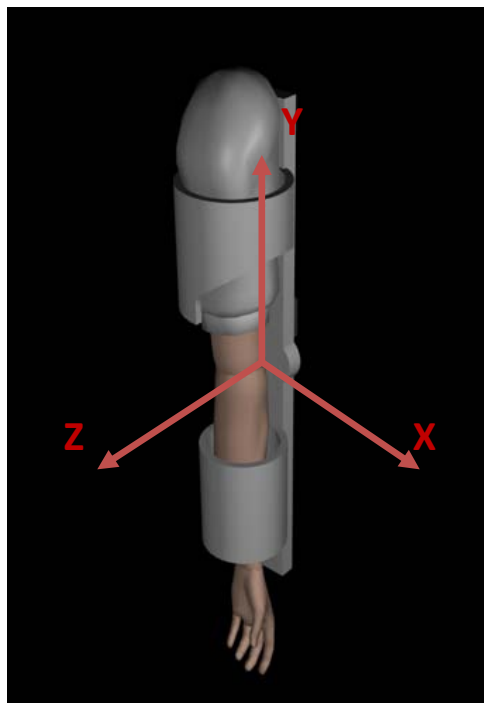


Imagen 8.1. Sistema de referencia del modelo.

A) Flexoextensión del codo. Brazo en posición vertical.

Con el brazo estático, se eleva el antebrazo para volver a su posición original.

B) Flexoextensión del codo. Brazo en posición horizontal.

Al igual que en el movimiento anterior pero con el sujeto tumbado.

C) Flexoextensión del hombro. Brazo en posición vertical.

El hombro realizará un movimiento de flexoextensión hacia arriba y regresará a su posición original.

D) Flexoextensión del hombro. Brazo en posición horizontal.

Al igual que en el movimiento anterior pero con el sujeto tumbado.

E) Estiramiento del brazo hacia arriba.

El movimiento pretende simular el alcanzar un objeto elevado, con lo que se estirará el brazo hasta alcanzar la vertical y luego descenderá.

Todas las trayectorias del modelo se moverán en el plano XY, o en planos paralelos, salvo un leve balanceo de las bolas del rodamiento.

En este movimiento el brazo comienza en reposo, con ambos segmentos apuntando al suelo, formando 90° con él. El motor del hombro girará en el vector Z.

En este movimiento el exobrazo avanza pivotando sobre el hombro hacia delante, mientras que el exoantebrazo realiza un movimiento similar ligeramente más rápido. Ambas piezas continúan avanzando en vertical, el exobrazo girando en torno al hombro y el exoantebrazo conservando cierta verticalidad en su movimiento.

F) Alargar el brazo hacia el frente con objeto de tomar algo con la mano.

El movimiento se define como “alargar y coger”. Simula el movimiento cotidiano de estirar el brazo hasta alcanzar un objeto lejano.

Al igual que en el movimiento anterior, se plantea dentro del plano XY. El movimiento comienza.

Aunque este movimiento suele estar acompañado por movimientos de torso para ayudar, se obviarán los movimientos del hombro, y se considerará un punto rígido.

El exobrazo comenzará a girar en torno al hombro, alcanzando poco a poco la horizontalidad. Ocurrirá lo mismo con el exoantebrazo.

G) Elevación lateral simple del brazo.

Este movimiento defiende la postura poco ortodoxa de elevar el brazo lateralmente, incluyendo el movimiento en el plano frontal. Se realiza para comprobar las tensiones

máximas sobre el rodamiento en cuanto a pares y esfuerzos axiales. Se ha utilizado esta postura por tratarse de un movimiento sencillo, caracterizable y que afecta a pocas variables del movimiento. De ese modo se pueden obtener datos muy concretos de un determinado movimiento.

H) Elevación lateral compleja del brazo (junto con doblado de codo).

Este movimiento completa el anterior, por tratarse de una variación del mismo. Si se estudia por separado es porque genera torsiones a tener en cuenta en el cálculo, siendo uno de los pocos movimientos que lo hacen.

Consiste en la elevación lateral del exobrazo, mientras que el exobrazo realiza un movimiento de giro con respecto al codo de aproximación hacia el hombro.

8.3. Diseño de funciones para su construcción.

A cada movimiento le corresponderá una función del tiempo para cada una de las articulaciones. Hay que dejar claro que el asunto que ocupa a este proyecto es el modelado y diseño del codo, y que aunque se parametrize el movimiento del hombro no se dará tanta importancia a los resultados obtenidos. Se introduce el hombro para incluir los movimientos relativos.

Estas son las funciones que se han escrito para definir los movimientos. Se han escrito en función de la rotación de cada una de las articulaciones (Θ) en radianes. Se han obtenido realizando varios ensayos no normalizados y generando datos sobre los que se ha aplicado la media. El resultado son el siguiente conjunto de funciones tomadas a puntos.

Esta es la función de referencia que se escribirá posteriormente para MATLAB. Será tarea del controlador PID obtener una buena aproximación.

A) Flexoextensión del codo. Brazo en posición vertical.

$$\theta_{hombro.Z}(t) = 0$$

$$\theta_{codo.Z}(t) = \begin{cases} 2.382 \cdot t & \text{si } 0 \leq t \leq 1.1 \\ 4.7544 - 2.3772 \cdot t & \text{si } 1.1 \leq t \leq 2.2 \end{cases}$$

B) Flexoextensión del codo. Brazo en posición horizontal.

$$\theta_{hombro.Z}(t) = 0$$

$$\theta_{codo.Z}(t) = \begin{cases} 2.382 \cdot t & \text{si } 0 \leq t \leq 0.89 \\ 4.5439 - 2.2720 \cdot t & \text{si } 0.89 \leq t \leq 2 \end{cases}$$

C) Flexoextensión del hombro. Brazo en posición vertical.

$$\theta_{hombro.z}(t) = \begin{cases} 2.5084 \cdot t & \text{si } 0 \leq t \leq 1.85 \\ 5.981 - 1.9937 \cdot t & \text{si } 1.85 \leq t \leq 2.2 \end{cases}$$

$$\theta_{codo.z}(t) = 0$$

D) Flexoextensión del hombro. Brazo en posición horizontal.

$$\theta_{hombro.z}(t) = \begin{cases} 4.2074 \cdot t & \text{si } 0 \leq t \leq 0.93 \\ 4.2698 - 0.373 \cdot t & \text{si } 0.93 \leq t \leq 3.92 \\ 13.0202 - 2.604 \cdot t & \text{si } 3.92 \leq t \leq 5 \end{cases}$$

$$\theta_{codo.z}(t) = 0$$

E) Estiramiento del brazo hacia arriba.

Ecuación para el movimiento del hombro.

$$\theta_{hombro.z}(t) = \begin{cases} 3.584 \cdot t & \text{si } 0 \leq t \leq 0.6 \\ 1.8436 + 0.6140 \cdot t & \text{si } 0.6 \leq t \leq 2.2 \\ 3.1989 - 0.0004 \cdot t & \text{si } 2.2 \leq t \leq 3.5 \\ 9.7301 - 1.8534 \cdot t & \text{si } 3.5 \leq t \leq 5.2 \end{cases}$$

Ecuación para el movimiento del codo con respecto del exobrazo.

$$\theta_{codo.z}(t) = \begin{cases} 2.0021 \cdot t & \text{si } 0 \leq t \leq 0.53 \\ 1.3807 - 0.5786 \cdot t & \text{si } 0.53 \leq t \leq 2.68 \\ -2.8498 + 0.9959 \cdot t & \text{si } 2.68 \leq t \leq 4.71 \\ 32.7685 - 6.5537 \cdot t & \text{si } 4.71 \leq t \leq 5.2 \end{cases}$$

F) Alargar el brazo hacia el frente con objeto de tomar algo con la mano.

Ecuación para el movimiento del hombro.

$$\theta_{hombro.z}(t) = \begin{cases} 1.859 \cdot t & \text{si } 0 \leq t \leq 0.45 \\ 0.6254 + 0.4727 \cdot t & \text{si } 0.45 \leq t \leq 2.14 \\ 5.7192 - 1.9064 \cdot t & \text{si } 2.14 \leq t \leq 3 \end{cases}$$

Ecuación para el movimiento del codo con respecto del exobrazo.

$$\theta_{codo.z}(t) = \begin{cases} 0.7413 \cdot t & \text{si } 0 \leq t \leq 1.91 \\ 3.9316 - 1.3105 \cdot t & \text{si } 1.91 \leq t \leq 3 \end{cases}$$

G) Elevación lateral simple del brazo. Abducción.

Ecuación para el movimiento del hombro.

$$\theta_{hombro.X}(t) = \begin{cases} 2.6283 \cdot t & \text{si } 0 \leq t \leq 1.06 \\ 2.5484 - 0.2306 \cdot t & \text{si } 1.06 \leq t \leq 3.28 \\ 9.6667 - 1.9333 \cdot t & \text{si } 3.28 \leq t \leq 5 \end{cases}$$

Ecuación para el movimiento del codo con respecto del exobrazo.

$$\theta_{codo.X}(t) = 0$$

H) Elevación lateral compleja del brazo. Abducción del hombro más flexoextensión del codo.

Ecuación para el movimiento del hombro.

$$\theta_{hombro.X}(t) = \begin{cases} 2.6283 \cdot t & \text{si } 0 \leq t \leq 1.06 \\ 2.5484 - 0.2306 \cdot t & \text{si } 1.06 \leq t \leq 3.28 \\ 9.6667 - 1.9333 \cdot t & \text{si } 3.28 \leq t \leq 5 \end{cases}$$

Ecuación para el movimiento del codo con respecto del exobrazo.

$$\theta_{codo.Z}(t) = \begin{cases} 2.382 \cdot t & \text{si } 0 \leq t \leq 1.1 \\ 4.7544 - 2.3772 \cdot t & \text{si } 1.1 \leq t \leq 2.2 \end{cases}$$

8.4. Programación de MATLAB.

Llegados a este punto se ha generado el modelo, creado las interacciones entre los sólidos y parametrizado muy básicamente el movimiento. Ahora se escribirá un programa para cada movimiento específico. Aunque todos tienen la misma estructura, hay variaciones leves que proporcionan los diversos datos necesarios para el proyecto.

Esta programación está escrita en los bloques descritos anteriormente, y ha sido adjuntada en el Anexo E de este documento.

8.5. Resultados.

Debido a la longitud de este apartado, ha sido movido al Anexo D. Resultados de las simulaciones. Se comenta aquí una tabla resumen de los distintos movimientos definidos anteriormente.

	Movimiento	Par máximo [N·m]	Potencia máxima [w]
Codo	A	25,65	80,63
	B	25,75	121,5
	C	24,7	-
	D	30,63	-
	E	27,74	96,6
	F	27,6	15,4
	G	-	-
	H	33,4	157,3
Hombro	A	-	-
	B	-	-
	C	75,21	244,6
	D	90,22	155,74
	E	69,94	287
	F	81,5	103,4
	G	73,7	245,3
	H	98,7	531

Tabla 8.1. Resumen de resultados de las simulaciones.

Según los resultados obtenidos el motor tiene que reunir las siguientes condiciones para su elección:

- su masa ha de quedar por debajo de los 5 kg (masa puntual que se ha utilizado para el cálculo por ordenador);
- la velocidad ha de poder alcanzar las 55 rpm;
- ha de prestar una potencia de 157,3 w;
- alcanzar un par de 33,4 N·m en condiciones normales.

8.6. Conclusiones.

Puede observarse una serie de patrones en los resultados obtenidos.

- en todos los movimientos en los que están implicadas ambas articulaciones, tanto los pares como el consumo eléctrico son superiores en el hombro que en el codo.
- Se observa un pico tanto en consumo eléctrico como en par necesario para el arranque de una simulación. Esto es lógico, dado que la energía necesaria para poner en marcha el sistema es mayor que para mantenerlo en funcionamiento.
- Se observa el mayor consumo eléctrico en la simulación H, tanto para el motor del hombro como para el del codo. Esto es debido a un movimiento más brusco por parte de ambos motores, y los consiguientes momentos lineales alcanzados por los sólidos.

Hay que ver estos resultados no como datos absolutos, sino como valores estadísticos medios o comunes, entendiendo tanto las simulaciones como los resultados obtenidos como valores aproximados dentro de los rangos de movimiento, pudiendo ser superados de modo puntual en alguna simulación. Es por ello que una vez que la bancada de pruebas esté en funcionamiento se harán ensayos dinámicos que darán resultados más refinados que los obtenidos en este documento.

Por lo tanto, estos datos han de leerse sin tener en cuenta las curvas en función del tiempo de un modo absoluto. De esta manera, los máximos o picos existen, y son de valores similares a los obtenidos, o incluso menores, pero pueden ocurrir medio segundo antes o después de lo mostrado en estos datos, o incluso en incrementos de tiempo superiores.

El análisis mediante PID ha introducido una continuidad en los resultados debido a un ajuste minucioso de cada uno de los motores en cada simulación mediante ensayo y error. Un compañero está ahora indagando un método de ajuste mediante algoritmo genético capaz de dar datos más realistas como respuesta. De este modo se podrá avanzar y concretar el modelo del actuador y sus características de un modo más fiable.

8.7. Motores comerciales propuestos.

Se enumera aquí una pequeña lista de motores comerciales que cumplen con las especificaciones de pares y potencia necesarios para el modelo calculado.

Debido a sus dimensiones, el motor irá alojado en un lateral del exobrazo, como se muestra en la imagen 8.2.

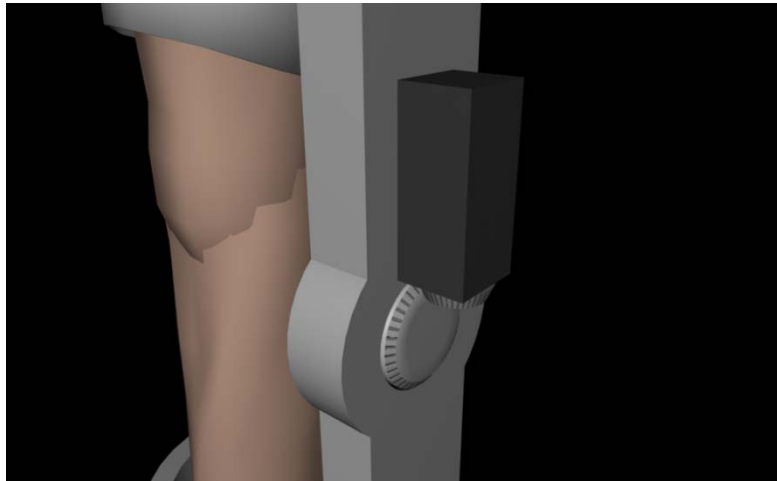


Imagen 8.2. Representación de la colocación del motor.

La mejor opción en cuanto a peso, par y potencia es el motor de neumático, ya que motores eléctricos requieren de unas dimensiones y pesos desmesuradas para las dimensiones de la bancada.

Se ha elegido del catálogo de la empresa GLOBE [29] los siguientes actuadores neumáticos con las características:

Model	Max.Power (kw)	Max.Speed (rpm)	Max torque (N·m)	Air consumption (m³/min)	Weight (kg)
5M43	0,67	450	57	0,8	2,4
5M34R	0,61	420	50	1,2	2,4

Tabla 8.2. Tabla con las especificaciones básicas de los motores óptimos para el modelo.

Aunque la elección de un motor neumático implica el uso de una serie de herramientas adicionales, se ha elegido este motor ya que sus características son las más similares a las que solicita el modelo. Además, al tratarse de una bancada de pruebas es capaz de mantener el equipo necesario cerca sin necesidad de moverlo.

No obstante, la elección del motor deberá hacerse en función del presupuesto, disponibilidad en el envío, tamaño, así como factores de régimen de funcionamiento en laboratorio, en función del uso que se le aplique. Ya sean condiciones de limpieza, humedad en el ambiente, o las ya mencionadas como pares y potencia.



CAPÍTULO IX. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS DOCENTES

9.1. Conclusiones

A lo largo de este proyecto se ha avanzado hacia una futura convergencia que será el final del Proyecto HYPER, dando uno de los primeros pasos en uno de los diseños preliminares.

Al final de este proyecto se ha conseguido obtener un modelo viable de exoesqueleto para el brazo, que se usará como bancada de pruebas en el RoboticsLab de la UC3M.

Partiendo de una serie de hipótesis como lo son el precálculo del capítulo 4, el considerar el hombro como un punto fijo en el espacio o el haber limitado el modelo a una serie de piezas simplificadas, se ha logrado llegar al cálculo de la potencia y por requeridos para dar movimiento al codo.

Se ha obtenido a su vez un rodamiento viable para el modelo, y un modelo lo suficientemente simple como para que pueda servir para hacer pruebas para la obtención de datos.

Se ha decidido utilizar un actuador comercial para la articulación del codo, situado sobre el brazo en paralelo. Del rotor saldrá un eje que empalmará con una rueda dentada, de modo que se unirá con la rueda dentada inserta en la pieza del exoantebrazo. Esto tiene las ventajas: sitúa el centro de gravedad más cerca del hombro, reduce su momento de inercia, introduce una posible reducción para aumentar la potencia del motor.

Por último, se han obtenido una serie de mejoras críticas que ayudarán al Proyecto HYPER en el diseño y configuración de un modelo completo del exoesqueleto.

Toda ayuda en este empeño es poca, porque aunque no se haya mencionado hasta ahora, el Proyecto HYPER no es sólo una serie de líneas de investigación, sino el enfoque de los mismos con un objetivo de ayuda a personas con una determinada dificultad, como son las enfermedades expuestas al principio de este proyecto.

Espero que el esfuerzo por parte de alumnos y profesores siga igual que hasta ahora con el objetivo común del proyecto HYPER.

9.2. Futuros trabajos docentes.

A lo largo del proyecto han surgido nuevos retos a solucionar. Aquí se mencionan, con objeto de animar a otros estudiantes a participar no solo en el proyecto HYPER, sino en el aumento del saber de la universidad.

Se sugieren como posibles trabajos docentes:

Mejora del Modelo Exobrazo

Mejora de los materiales principales

En este proyecto, con objeto de ganar ligereza y centralizar el esfuerzo en la obtención de los datos necesarios para alcanzar un rodamiento y un motor óptimos, se han mencionado ligeramente los materiales a utilizar.

Estos materiales son apropiados para un modelo virtual, e incluso para el futuro banco de pruebas del RoboticsLab, pero no para poner sobre una persona.

Por ello se anima al estudio de materiales con mejores características mecánicas, como puede ser la fibra de carbono.

Rediseño para la adaptación a sus componentes futuros

El exoesqueleto resultado de este proyecto fin de carrera carece de dos aspectos básicos para el funcionamiento final del exoesqueleto.

Un exoesqueleto final operativo ha de contar no solo con un motor en el brazo, sino con una cadena de motores dependientes de alimentación y derivación a tierra. Además, el exoesqueleto ha de contar con multitud de sensores (presión, temperatura, posición, aceleración, etc.) para un correcto funcionamiento.

Sobre el exoesqueleto, por lo tanto, habrá que construir una red de sensores, cableado, actuadores, circuitos, etc., que trabajen en armonía con los sólidos del modelo.

El proceso entre el diseño mecánico final ha de adoptar desde el principio un carácter iterativo, abierto a cualquier posible modificación.

Tanto si las líneas de cableado principales circulan por el interior o el exterior del exobrazo, han de estar accesibles para mantenimiento o análisis, han de quedar lo suficientemente sujetas como para que durante el funcionamiento normal del exobrazo no causen inconvenientes.

Por ello se sugiere colocar las líneas principales en un canal interior del exoesqueleto accesible a través de una mampara.

Mejora en la biocompatibilidad de los materiales

Como se ha mencionado con anterioridad, los materiales usados en este proyecto no son ni mucho menos adecuados para cubrir a una persona.

El exobrazo deberá ser cubierto, en las zonas expuestas a la piel, de los materiales necesarios para eliminar la irritabilidad de la piel así como trastornos como temperaturas extremas (por metal (frio) o por rozaduras (calor)), dentera o posibles electrocuciones.

El material que cubra los amarres del brazo y antebrazo ha de cumplir las siguientes catacterísticas:

- no reactivo con la piel o la atmósfera
- no conductor de la electricidad
- cómodo
- transpirable
- adaptable bajo presión

Este material, a parte de esas características ha de permitir el intercambio de información entre los músculos y la unidad de control a través d los sensores cutáneos.

Mejora de las abrazaderas

Con objeto de un correcto funcionamiento del exoesqueleto los abrazadores han de sujetar con firmeza pero sin presión excesiva los distintos segmentos del brazo. Es por ello que requieren de un mecanismo de cierre regulador en el tiempo, de modo que los dobleces o los estiramientos de la piel no produzcan lesiones cutáneas.

Se propone para ellos una abrazadera abierta, que permita una cierta flexibilidad en el movimiento; con un actuador hidráulico que modifiquen la presión de la pinza/pieza.

Como medida de precaución para la abrazadera se proponen un fusible mecánico que salte a sobrepresión.

Las abrazaderas, además de estas mejoras han de contar con cierto desplazamiento longitudinal que no produzcan en la piel estados tensionales nocivos.

Se propone unos rieles longitudinales dentados o un freno de velocidad mediante varillas a lo largo de los segmentos del exoesqueleto.

Mejora en el anclaje del hombro

En este proyecto se han considerado para el cálculo una serie de hipótesis como es la inmovilidad del hombro.

En el modelo final, como todo cuerpo humano, el hombro habrá de contar con sus 7 grados de libertad.

Es por ello que habrá que plantearse el problema de la implementación del exobrazo en el hombro. Sus deslizamientos conjuntos harán difícil una solución simple.

Adaptación de la muñeca

En este proyecto fin de carrera no se ha mencionado la articulación de la muñeca salvo en una breve reseña biomecánica. En estos momentos un compañero de la universidad está planteando un modelo análogo al de este proyecto para la mano.

Entre ambos proyectos se encuentran los movimientos de la muñeca más el movimiento de cruce de huesos de la pronosupinación.

En cuanto a esta última, un actuador que varíe la posición angular de la abrazadera del antebrazo debería ser suficiente (junto con la idea antes mencionada del deslizamiento de dicha abrazadera a lo largo de la longitud del segmento del antebrazo).

En cuanto a la muñeca, habría que incluir otros dos actuadores, por lo menos, para simular un movimiento similar.

Traducción de este documento al inglés

Con objeto de hacer este documento de uso más general, se sugiere traducir su totalidad o una breve reseña al inglés.

Un proyecto como es el proyecto HYPER debería contar con su documentación en inglés.

ANEXO A. JUSTIFICACIÓN DE LOS CÁLCULOS DEL RODAMIENTO

A.1. Introducción

Aunque la elección del rodamiento se ha realizado mediante un proceso iterativo se exponen aquí las ecuaciones y elementos que justifican la durabilidad del rodamiento elegido para el diseño. No se expondrá aquí el método por el cual se ha elegido el rodamiento.

A.2. Rodamiento y características

El rodamiento utilizado en el cálculo de este proyecto ha sido el modelo “16004D” de la marca ZKL, que corresponde a su vez al modelo “16004” de SKF.

Las propiedades son las siguientes:

A.2.1. En cuanto a dimensiones:

Como se menciona a lo largo del proyecto, el hueco en el que el rodamiento va a ir insertado y las dimensiones del propio rodamiento conllevan un proceso de avance en círculos en el que poco a poco se precisan las medidas necesitadas y de diseño.

Esto ha llevado a las siguientes dimensiones:

Dimensiones [mm]			
d	D	B	r _s
20	42	8	0,3

Tabla A.1. Dimensiones del rodamiento 16004.

A.2.2. Cargas

Se exponen aquí los distintos niveles de carga admitidos por el rodamiento, tanto axial como radial:

Capacidad de carga elemental [kN]		Límite de fatiga [kN]
Dinámica (C _r)	Estática (C _{cr})	P _u
9,371	4,972	0,226

Tabla A.2. Capacidad de carga del rodamiento 16004.

No se sobrepasa ninguno de los valores, por lo que el rodamiento elegido es óptimo para los valores de cargas del proyecto.

A.2.3. Lubricación

Para evitar el desgaste o deterioro de un rodamiento, los fabricantes aconsejan el uso de distintos sistemas de lubricación. Las velocidades de trabajo del rodamiento no se alcanzarán en el modelo una vez construido. Hay que recordar que estos rodamientos son diseñados para procesos mucho más bastos y con condiciones críticas.

El hecho de no necesitar lubricación (Tabla A.3) ha sido uno de los motivos de la elección de este rodamiento.

Velocidad límite de giro para lubricación [min ⁻¹]	
Grasa	Aceite
17000	20000

Tabla A.3. Condiciones de lubricación.

A.2.4. Masas y características del material

El rodamiento, compuesto por un anillo perimetral, uno interior y once esferas tiene una masa total de:

Masa [kg]
0,05

Tabla A.4. Masa del rodamiento.

Siendo las propiedades del material (Acero Inoxidable 420) las siguientes:

Densidad	7750,000 kg/m ³
Coefficiente de expansión térmica	0,0000 °C ⁻¹
Thermal Conductivity	0,025 kW/m°C
Specific Heat	502,000 J/kgK
Modulus of Elasticity	199947953,000 kPa
Poisson's Ratio	0,29
Yield Stress	344737,850 kPa
Ultimate Stress	655001,915 kPa

Tabla A.5. Características del acero 420. [28]

A.2.5 Nomenclatura

Se explica, con objeto de no alargar con datos este anexo, las especificaciones de nomenclatura que atañen al rodamiento elegido.

El diámetro del agujero es el resultado de multiplicar por 5 las dos últimas cifras, p.e. el rodamiento 1320 tiene el diámetro del agujero $d = 20 \times 5 = 100$ mm.

D - Rodamiento de una hilera de bolas de tipo 160 con mayor capacidad de carga.

A.3. Cálculos

Los cálculos aquí resumidos han sido consultados en varias tablas, gráficas y expresiones experimentales que no aparecen aquí. El método de cálculo ha sido obtenido de la página web de ZKL.

Duración

La duración de un rodamiento es el número de revoluciones que efectúa un aro en consideración del otro aro hasta el momento en el que aparecen los primeros signos de fatiga del material en uno de los aros o en alguno de los elementos rodantes.

Se pueden encontrar diferencias considerables en la duración de rodamientos del mismo tipo y tamaño y por eso para el cálculo de la duración según la norma STN ISO 281 se toma en consideración la duración elemental, es decir, la duración que consigue o sobrepasa el 90% de la cantidad mayor de los rodamientos iguales que funcionan bajo condiciones idénticas, esto significa duración con una fiabilidad del 90%.

La duración elemental del rodamiento se define matemáticamente por la fórmula de la duración que es válida para los rodamientos de todos los tipos.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad \text{o} \quad \frac{C}{P} = (L_{10})^{\frac{1}{p}}$$

Duración elemental [rev].

Donde:

L_{10} - Duración elemental [10^6 revoluciones]

C : Carga dinámica equivalente del rodamiento (9.371)[kN]

P: Carga dinámica equivalente del rodamiento [kN]

p: Exponente: $p = 3$ para rodamientos de bolas

Para el rodamiento que nos atañe:

Para la obtención de P:

$$P_r = X.F_r + Y.F_a \text{ [kN]}$$

Donde:

P_r - Carga radial dinámica elemental [kN]
 F_r - Fuerza radial que actúa al rodamiento [kN]
 F_a - Fuerza axial que actúa al rodamiento [kN]
 X - Factor radial
 Y - Factor axial

Se considera como carga axial y radial la suma total de la masa del antebrazo (5,575 kg):

$$P_r = 0,1400064 \text{ kN}$$

Y por lo tanto:

$$L_{10} = 299857 \cdot 10^6 \text{ revoluciones}$$

Esto es muchísimo más de lo que se necesita para experimentos en el laboratorio.

Otro valor interesante es la duración en horas para la velocidad nominal:

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n}$$

Ecuación de la duración.

Duración elemental [h]

L_{10h} - Duración elemental [h]
 n - Velocidad de giro [min^{-1}]

Se ha tomado $n = 100 \text{ min}^{-1}$ redondeando la cifra de la velocidad máxima del movimiento para aplicar otro factor de seguridad.

Con estos datos se obtiene:

$$L_{10h} = 49976161.6 \text{ horas}$$

De nuevo un número de horas muchísimo mayor al necesario, por lo que el mismo rodamiento será utilizado en toda la vida útil del modelo.

Ecuación de duración ajustada

La duración ajustada es la duración elemental corregida. Para el cálculo se toma en cuenta además de la carga también la influencia del material de los componentes del rodamiento, las cualidades químicas y físico-mecánicas del lubricante y el régimen de la temperatura de trabajo.

$$L_{na} = a_1 \cdot a_{23} \cdot L_{10}$$

Ecuación de la duración ajustada.

Donde:

L_{na} : Duración ajustada para la fiabilidad (100-n)%

a_1 : De duración para fiabilidades diferentes al 90%

a_{23} : Factor de duración para material de cualidades no convencionales que incluye el nivel de la tecnología de fabricación y las condiciones de funcionamiento

L_{10} - Duración elemental

$$L_{na} = 149928.5 \cdot 10^6 \text{ revoluciones}$$

Como se observa, el número de revoluciones ha sido reducido a la mitad, y aún así supera en 150 mil veces la “vida infinita” o el millón de revoluciones.

Ecuación de la duración en km

Aunque este valor sólo se da para rodamientos asidos a ejes de tren o de vehículos de competición ayuda a dar una idea aproximada de duración:

$$L_{10km} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot \frac{\pi D}{1000}$$

Ecuación de la duración en km.

donde:

L_{10km} - Duración elemental [km]

D - Diámetro de la rueda [m]

De este modo, se obtiene un valor de:

$$L_{10km} = 39.6 \cdot 10^6 \text{ km}$$

Por intentar ver este número de algún modo, cada una de las bolas de rodadura del rodamiento tendría que avanzar 39 millones de kilómetros hasta que el rodamiento perdiese integridad. No hace falta decir que son muchos kilómetros.

La razón de que se hayan obtenido resultados tan altos es que el rodamiento está sobredimensionado para el uso que se le dará. Se ha elegido este tipo de rodamientos, a pesar de que sus capacidades excedan en mucho las necesarias, por su bajo coste.

En el mercado, sin comprar al por mayor, se registra un precio de venta que ronda los 2 euros la unidad a día de hoy en los portales de venta en internet.

ANEXO B. GLOSARIO

Se ha decidido facilitar un glosario de palabras repetidas a lo largo de este proyecto con objeto de hacer más sencilla su consulta.

B.1. Anatomía

Biomecánica: disciplina que estudia los modelos, fenómenos y leyes que sean relevantes en el movimiento (incluyendo el estático) de los seres vivos.

Brazo: segmento del cuerpo humano parte de las extremidades superiores. Comprende desde el hombro hasta el codo.

Antebrazo: segmento del cuerpo humano parte de las extremidades superiores. Comprende desde el codo hasta la muñeca.

Próximal: más cercano al centro (tronco cuerpo) o al punto de unión del cuerpo. Si se da otro punto de referencia, como por ejemplo el corazón, el punto proximal de otro órgano o extremidad es el punto más cercano de ese órgano o extremidad al corazón (central en lugar de periférico).

Distal: sitios que se localizan lejos del centro o la línea media del cuerpo, como la mano que es distal al hombro o el pulgar que es distal a la muñeca.

B.2. Modelado

Exobrazo: sólido o conjunto de sólidos que por analogía constituyen el “brazo” del exoesqueleto.

Exoantebrazo: sólido o conjunto de sólidos que por analogía constituyen el “antebrazo” del exoesqueleto.

Extrusión: generado de un volumen barriendo una línea recta con una figura plana cerrada.

Revolución: generado de un volumen barriendo girando una figura plana con respecto de un eje.

Operaciones booleanas: es una estructura algebraica que rigorizan las operaciones lógicas Y, O y NO, así como el conjunto de operaciones unión, intersección y complemento.

MATLAB: motor de cálculo utilizado para infinidad de aplicaciones. En el proyecto se utiliza para generar un diagrama de flujo de datos para obtener una solución.



B.3. Otros

Mecatrónicos: es una sinergia que une la ingeniería mecánica, ingeniería electrónica, ingeniería de control e ingeniería informática.

Cinemática: rama de la mecánica clásica que estudia las leyes del movimiento de los cuerpos sin tener en cuenta las causas que lo producen, limitándose, esencialmente, al estudio de la trayectoria en función del tiempo.

ANEXO C. BREVE MANUAL DE MSC.ADAMS

A continuación se va a proceder a explicar de una forma básica el funcionamiento del programa de simulación MSC.ADAMS R3 View, la interfaz, las posibilidades de diseño, de simulación, animación y obtención de resultados.

El programa MSC.ADAMS View es un programa de simulación en tres dimensiones orientado hacia la simulación de mecanismos. Su mayor virtud es, una vez simulado el modelo, la obtención directa de todo tipo de resultados, de una manera directa y muy fiable, por lo que este ha sido el programa fundamental utilizado para la obtención de los datos, (gráficas, tablas,...) que se exponen en el presente proyecto.

Una vez iniciado el programa MSC.ADAMS View, aparecerá el siguiente menú de inicio:

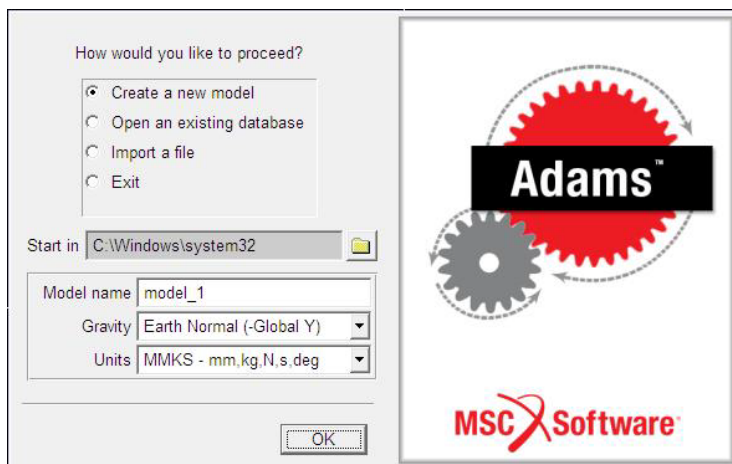


Imagen C.1. Menú de inicio.

En ella, como en cualquier programa de Windows se podrá definir iniciar un nuevo modelo, abrir una base de datos ya existente (abrir un modelo guardado anteriormente), importar un archivo o salir del programa. Además se podrá definir la carpeta en la cual se guardarán por defecto las bases de datos creadas.

Como ayuda para futuros Proyectos es aconsejable cambiar esta carpeta, ya que una vez en "system32" podemos modificar alguna carpeta crítica del sistema y perder datos.

Se podrá también definir el nombre del archivo, si se desea dar gravedad (por defecto la de la superficie de la Tierra), así como el sistema de unidades, muy importante para diseñar y para la obtención de resultados, MMKS (mm,kg,N,s,deg) por defecto.

C.1. Controles básicos

Si se inicia un modelo nuevo, aparecerá el espacio de trabajo, con la barra de tareas básica:

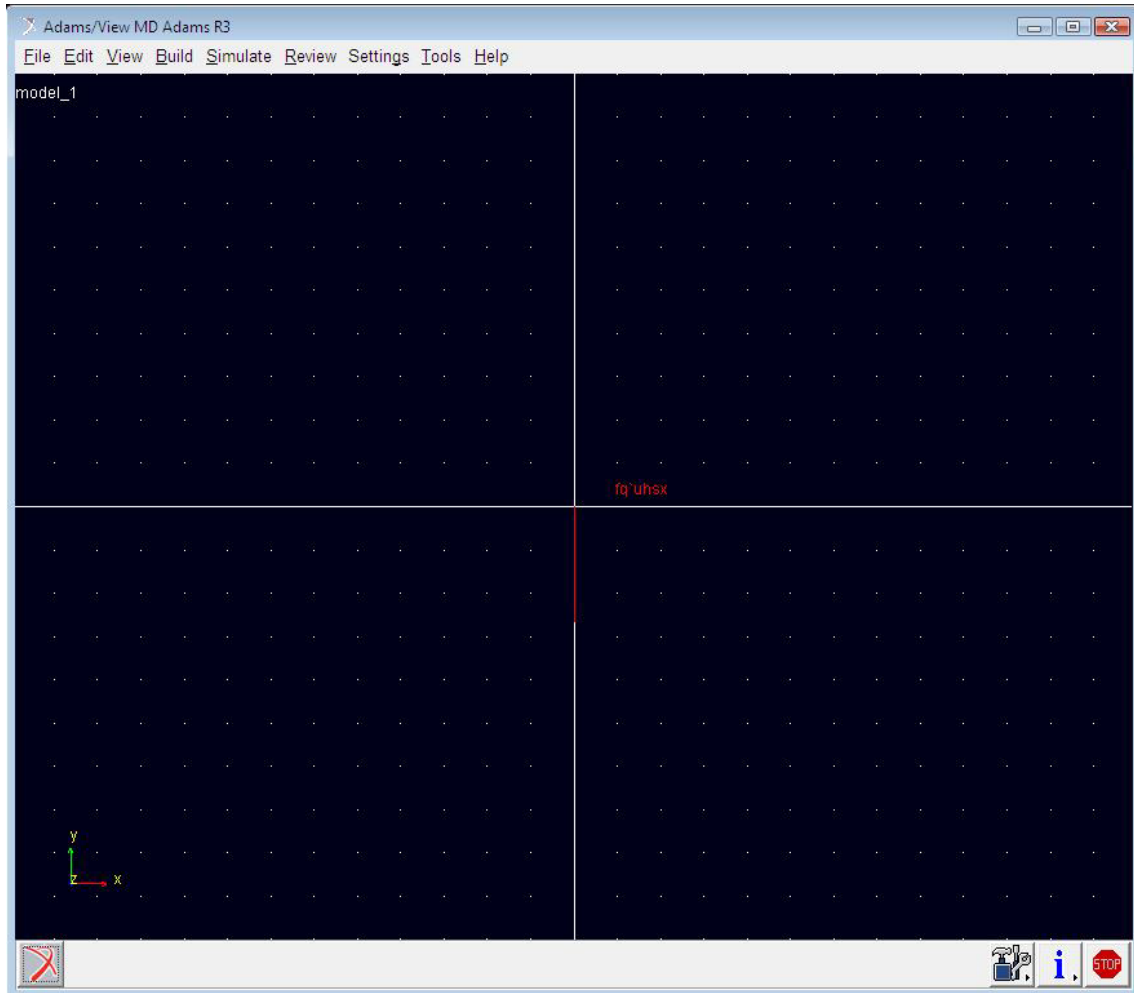


Imagen C.2. Espacio de trabajo y barra de tareas.

En la parte superior aparecen las opciones clásicas de FILE, para guardar, cargar, exportar, etc; SETTINGS, donde se podrán configurar las unidades de trabajo, modificar la gravedad, la malla para diseñar y otras opciones y HELP, donde se podrán hacer consultas de sobre dudas. En EDIT, VIEW, BUILD, SIMULATE, REVIEW y TOOLS se podrán acceder a ellos de una forma básica a través de la barra de tareas ó del botón derecho del ratón.

El espacio de trabajo por defecto está situado en el plano X-Y, en $Z=0$, con el eje Z saliendo del plano de trabajo. La gravedad sigue la dirección del eje Y en sentido negativo. Puede verse como una flecha roja en el plano Y-Z.

A continuación se procederá a explicar la barra de tareas con sus funciones elementales. Para acceder a ella pulsamos View > Toolbox and Toolbars... y seleccionamos "Main Toolbox". Veremos aparecer la siguiente ventana:

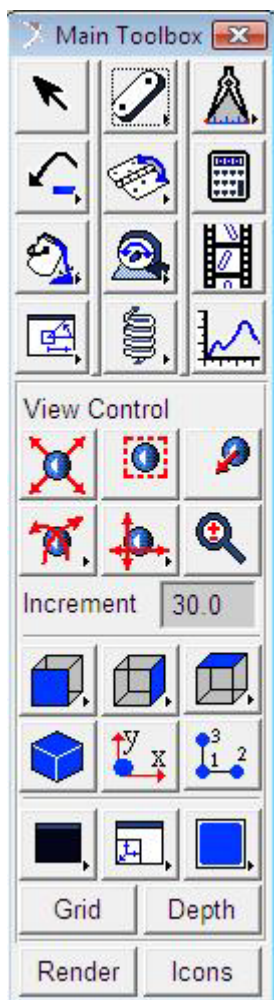


Imagen C.3. Main Toolbox.

Las opciones para generar diferentes vistas del modelo son las que aparecen seleccionadas por defecto:



Imagen C.4. Modo de vistas.

Con las primeras opciones (izquierda), de izquierda a derecha y de arriba a abajo se puede: encuadrar, dar zoom a una determinada zona, moverse a un punto determinado, girar o rotar en el plano, desplazarse en el plano y dar zoom. Hay que aclarar que los iconos con una flecha en la parte inferior derecha son desplegable con más opciones. Para acceder a estas opciones hay que pulsar el botón derecho del ratón sobre ellas.

Con las segundas (derecha) se podrá variar el plano de trabajo, frontal o posterior, izquierda o derecha, superior o inferior o en isométrico. Además se podrá situar el plano de trabajo en un cuerpo según sus ejes X-Y ó alinear el plano por tres puntos.

Con estos tres iconos se podrá modificar el color del fondo de trabajo, dividir la pantalla o dar más opciones:



Imagen C.5. Otras opciones.

Por último, con los cuatro últimos iconos se podrán realizar las siguientes funciones:

- GRID: Se activa o desactiva la malla de trabajo.
- DEPTH: Se cambia la perspectiva de la profundidad.
- RENDER: Se renderizan los elementos.
- ICONS: Rehacen visibles o no los iconos en los elementos.

C.2. Diseño y construcción

Para diseñar sólidos vamos a la ventana “Main Toolbox” y pulsamos con el botón derecho sobre la siguiente figura:



Desplegándose nos la siguiente tabla de figuras y operaciones:

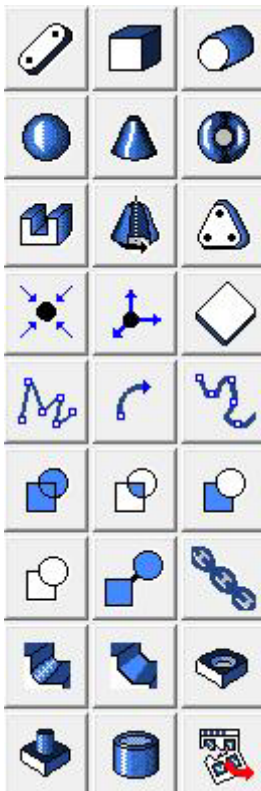


Imagen C.6. Creación de sólidos y operaciones entre ellos.

Los sólidos que podemos diseñar son los siguientes:



Imagen C.7. Sólidos.

Se detallan a continuación, incluyendo sus características.



PARALELEPÍPEDO: Primero se dimensiona la base y se extruye (profundidad “deep”). Se extruye sólo en una dirección. El punto (o marker) asociado a este volumen se encuentra en el punto en que se ha hecho click por primera vez para arrastrar, que constituye una de las esquinas del paralelepípedo. Consta de tres dimensiones:



CILINDRO: Se dimensiona de perfil y se le da la orientación deseada. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo. El marker asociado se encuentra en el centro de una de sus caras planas, mirando hacia el interior del cilindro. Tiene las dimensiones “length” (altura) y “radius” (radio).



ESFERA: Se define el centro, coincidiendo con el marker asociado. Para más detalles el sólido en realidad es un paraboloide, de modo que no tiene por qué tener un radio constante a lo largo de su superficie. Se dan tres parámetros, los tres diámetros coincidentes con los ejes.



CONO: Se dimensiona de perfil. Es recomendable predefinir sus dimensiones. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo. El marker se encuentra en el centro de la base, mirando hacia dentro del cono. Tiene la opción de crear un cono truncado sin tener que recurrir a operaciones booleanas.



TOROIDE: Se define el centro (marker) . La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo. Se definen las medidas R1 (radio desde el marker hasta el centro del círculo de revolución) y R2 (el radio del círculo de revolución).



ESLABÓN: Se define su longitud entre centros de redondeo de los extremos. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo. Posee dos markers, uno inicial y otro final, que en un principio seguirán el orden de creación del eslabón.



PLACA: Tiene las esquinas redondeadas. Se define su forma mediante una línea con el botón izquierdo del ratón, cuando se desee finalizar se pulsará el botón derecho. La placa se define entre los centros de redondeo de las esquinas. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



EXTRUSIÓN: Se define la forma mediante una línea ya creada o definiéndola con el ratón. Se extruye sólo en una dirección, por lo que debe ser definida.



SÓLIDO DE REVOLUCIÓN: Se define el eje de revolución y el perfil de revolución. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



PLACA: Se define como el paralelepípedo, pero ni se extruye ni tiene masa.

En caso de que no se pueda establecer la orientación durante el diseño del sólido, ésta será siempre perpendicular a la malla y situada sobre ella en el caso de que esté activada, y perpendicular a la vista del espacio de trabajo en el caso de que esté desactivada.

C.2.1. Operaciones booleanas

Las operaciones booleanas se utilizan para combinar sólidos rígidos. A continuación se explicarán las más importantes:



UNIR: Fusiona dos sólidos de manera que se transforma en uno sólo. Las dimensiones de los sólidos que lo componen no se pueden modificar.



PEGAR: Une dos sólidos manteniendo las posiciones uno respecto de otro. Las dimensiones de los sólidos sí se pueden modificar.



INTERSECTAR: Al aplicar esta función el sólido resultante es la intersección de los dos sólidos definidos.



CORTAR: El sólido elegido en primer lugar es cortado por el elegido en segundo lugar, desapareciendo entonces el segundo sólido.

C.2.2. Modificación de los Sólidos

Las siguientes operaciones sirven para modificar los sólidos rígidos:



CHAFLÁN: Genera un chaflán de 45° con la anchura especificada. Se eligen las aristas con el botón izquierdo del ratón y se finaliza la operación con el derecho.



REDONDEO: Genera un redondeo con el radio especificado. Se eligen las aristas con el botón izquierdo del ratón y se finaliza con el derecho.



AGUJERO: Genera un agujero de radio y profundidad especificada en la cara elegida en sentido perpendicular a la misma.



MACHO: Genera un macho a modo de tornillo de radio y longitud especificada en la cara elegida en sentido perpendicular a la misma.



VACIADO: Genera un vaciado en las caras seleccionadas con una anchura de pared especificada.

Los sólidos diseñados por defecto no tendrán contacto entre sí, lo que es beneficioso a la hora de diseñar en 2-D, ya que no existirá interferencia entre las piezas.

C.2.3. Modificación de las especificaciones iniciales de los Sólidos

Los sólidos diseñados pueden ser modificados normalmente tanto en posición como en dimensiones, pero la forma de hacerlo depende de cómo haya sido diseñado.

La posición y las dimensiones pueden ser modificada de de dos maneras, en función de si han sido referidos a puntos o no. Si han sido añadidos a puntos, la posición y las dimensiones deberán ser modificadas reubicando los puntos mediante “Point Table”. Si no han sido referidos a puntos, la posición y las dimensiones se modifican de las siguientes maneras.

Posición

La posición se puede modificar haciendo click dos veces con el botón izquierdo del ratón o con el desplegable del botón derecho indicando la parte (PART) y Modify:

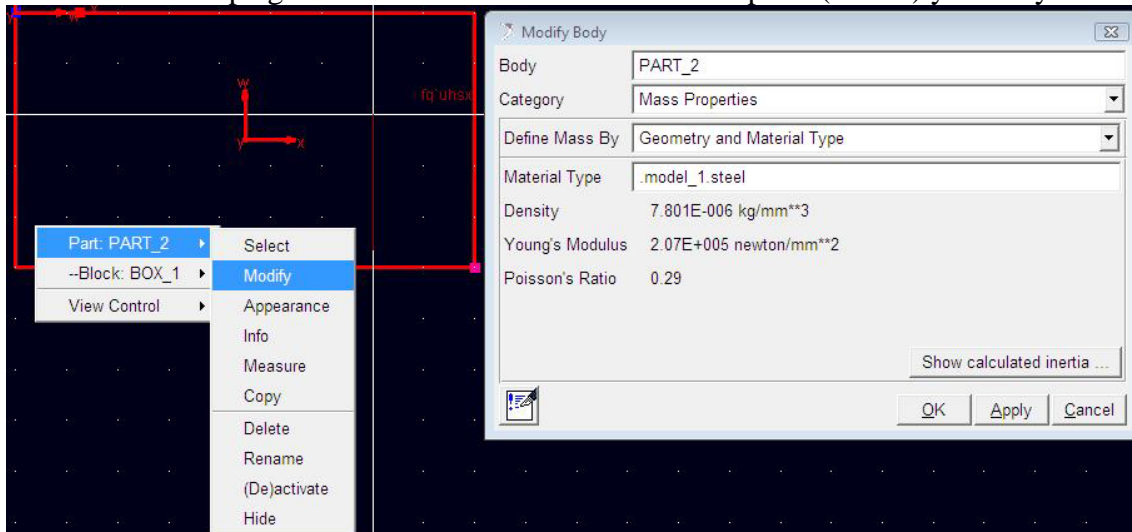
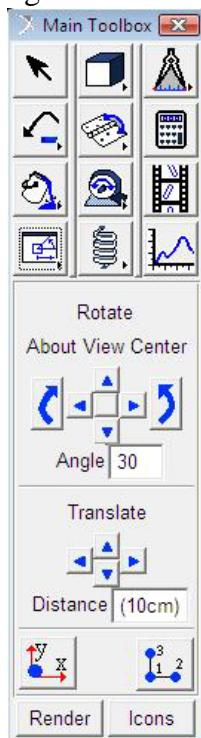


Imagen C.8. Modificar la posición I.

En “Category” se indica “Name and Position” y se posiciona el centro de masas de la pieza en “Location” teniendo en cuenta de que son coordenadas locales. Además se podrá variar la orientación del sólido en “Orientation”.

Otra forma es utilizando directamente los iconos de la barra de tareas. Si se pincha en el siguiente icono:



La barra de tareas se transforma en la que aparece a la izquierda. Si se selecciona directamente el sólido que queremos con el cursor se podrá modificar su posición con las opciones que aparecen en la imagen.

Si se abre el desplegable del icono anterior aparecen las siguientes opciones:

De las opciones anteriores destacan las siguientes:



TRASLACIÓN: Traslada un sólido desde una posición a otra. Es conveniente utilizar los MARKERS.



ROTACIÓN: Gira un sólido un ángulo prefijado según un eje especificado. Es conveniente utilizar los MARKERS.

Imagen C.9. Modificar la posición II.



ALINEACIÓN: Alinea la cara elegida de un sólido respecto a otra cara seleccionada de otro.

Dimensiones

Se modifican con el desplegable del botón derecho e indicando dentro de PART el sólido:

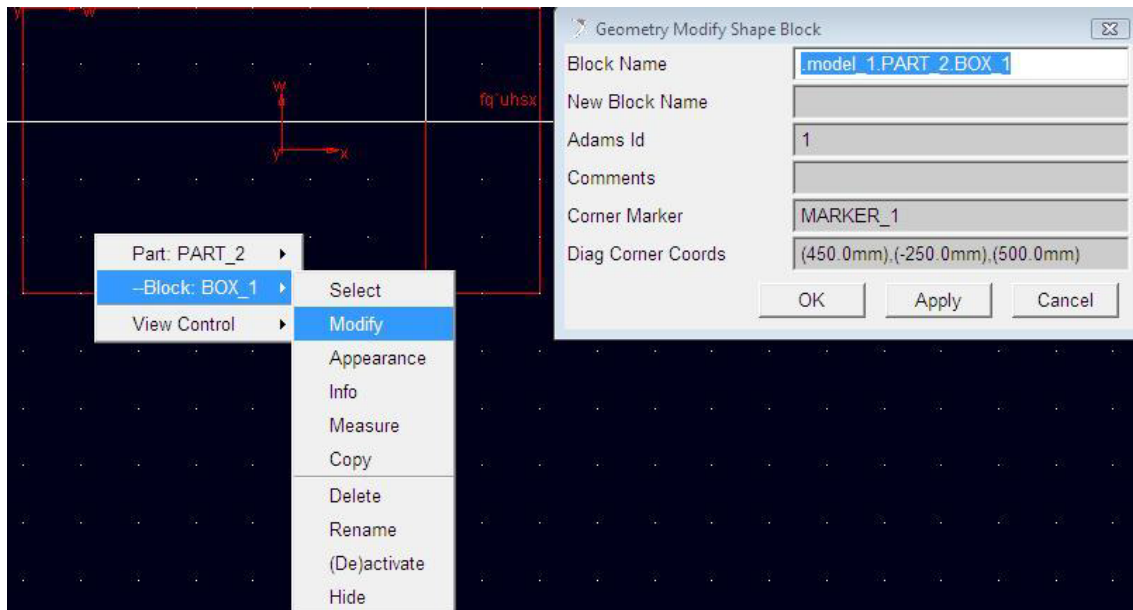


Imagen C.10. Modificar las dimensiones de un sólido.

En ocasiones no se pueden modificar todas las dimensiones, por lo que se eliminará el sólido y se dimensionará de nuevo. Para eliminar un sólido se puede realizar seleccionándolo y pulsando “Ctrl+X” o con el desplegable del botón derecho y en “Delete”. Si se quieren eliminar varios sólidos se pueden seleccionar utilizando la tecla Ctrl y seleccionándolos con el ratón y utilizando “Delete” del menú “Edit”.

Los colores de los sólidos pueden ser modificados utilizando el icono desplegable:



Durante el diseño siempre se podrá deshacer una operación errónea con el icono:



C.3. Diseño de juntas, actuadores y fuerzas.



Una vez diseñados los sólidos y determinado su posición se procederá a aplicar las juntas y restricciones de movimiento para que el mecanismo se comporte como se desee.

JUNTAS:

En la barra de tareas se dispone de las opciones de la izquierda.

Imagen C.11. Juntas y actuadores.

Para el diseño de juntas en principio se dejará el menú de construcción tal y como viene por defecto, es decir, dos cuerpos y una localización. La manera de situarlas es elegir con el ratón los sólidos, o un sólido y el suelo (uno a uno) y por último la localización (punto sobre el que pivota uno con respecto al otro). En ocasiones, debido al número de sólidos, markers, puntos, etc., que hay en una determinada zona se hace difícil elegir lo que se desea, por lo que en esos casos, una vez elegida la junta se pulsará con el botón derecho en la zona donde se quiere situar y aparecerá un cuadro de diálogo como el siguiente, donde se podrá seleccionar los sólidos ó elementos de diseño si procediese:

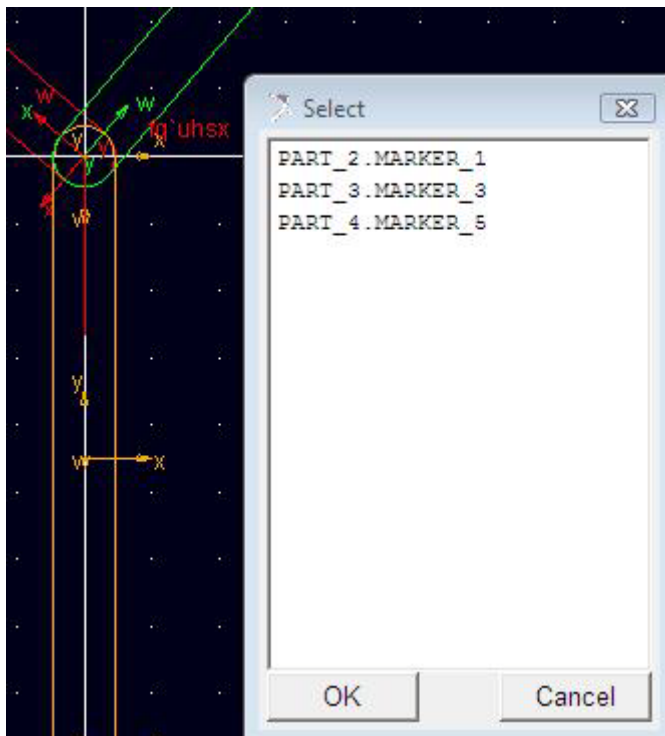


Imagen C.12. Selección de elementos.

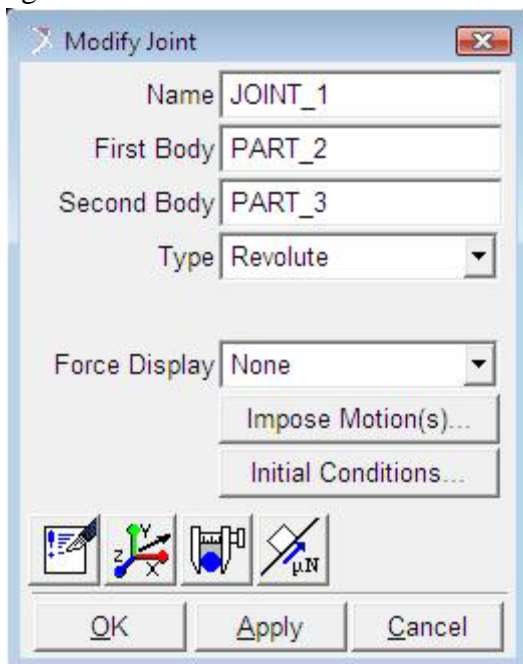
De todas las juntas y restricciones se suelen utilizar las más sencillas:



JUNTA DE ROTACIÓN:

Restringe totalmente el movimiento de traslación y la rotación en dos direcciones, permitiendo por tanto la rotación en una sola dirección. La dirección de rotación es, por defecto, normal a la malla si está activada, o perpendicular a la vista seleccionada en ese momento si está desactivada.

Si se desea modificar pulsaremos con el botón derecho en modificar y aparecerá el siguiente menú:



En este menú se podrá redefinir los sólidos que componen la junta, el tipo de junta, si deseamos aplicar una fuerza, realizar medidas, desplazar o girarla o incluso darle fuerza de rozamiento.

Imagen C.13. Menú para modificar juntas.

El menú de movimientos es el siguiente:

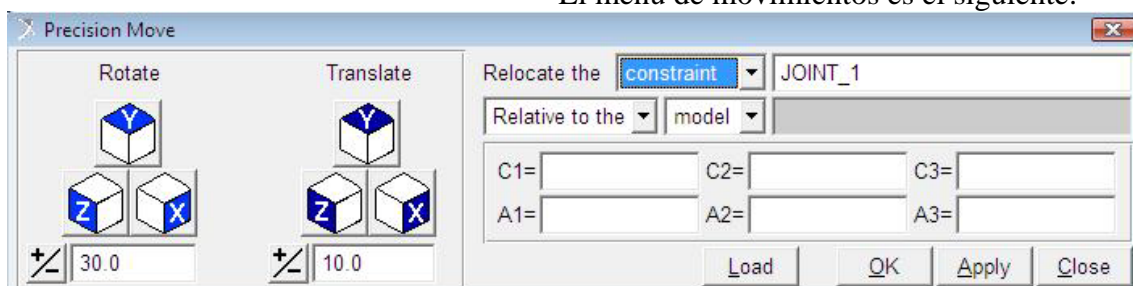


Imagen C.14. Menú de movimientos de precisión de juntas.

La principal aplicación de éste menú es la posibilidad de girar juntas en las tres direcciones del plano cuando la dirección especificada no es válida para el diseño.

En el menú de fuerzas de rozamiento por defecto las juntas son ideales, no tienen rozamiento, pero éste se puede definir de la forma que se desee.

JUNTA DE TRASLACIÓN:



Restringe el movimiento de tal manera que sólo se permite la traslación en una dirección. La dirección de movimiento, una vez seleccionados los sólidos (o el suelo) debe ser especificada. Los menús son iguales que el caso anterior.

JUNTA FIJA:



Restringe el movimiento de tal manera que anula todos los grados de libertad de un sólido respecto de otro o de un sólido respecto al suelo.

Es importante entender que a la hora de diseñar juntas los sólidos no tienen por qué estar en contacto. La junta si ha sido diseñada correctamente no necesita que las piezas estén físicamente en contacto.

ACTUADORES

Los actuadores generan movimiento en los sólidos rígidos. Son los siguientes:

MOTOR LINEAL:



Se debe aplicar en una junta de traslación ó cilíndrica.

Genera movimiento lineal en una dirección que debemos especificar. La velocidad debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.

MOTOR ROTATIVO:



Se debe aplicar en una junta de rotación ó esférica. Genera un movimiento angular en la dirección de la junta. La velocidad angular debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.

ACTUADOR LINEAL DE UNA SOLA DIRECCIÓN:

Se especifica por defecto entre dos sólidos, o un sólido y el suelo, y con una dirección. La velocidad debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.

ACTUADOR:



Se especifica entre dos sólidos y la localización. Una vez situado aparece un cuadro de diálogo en el que se define el movimiento del actuador.

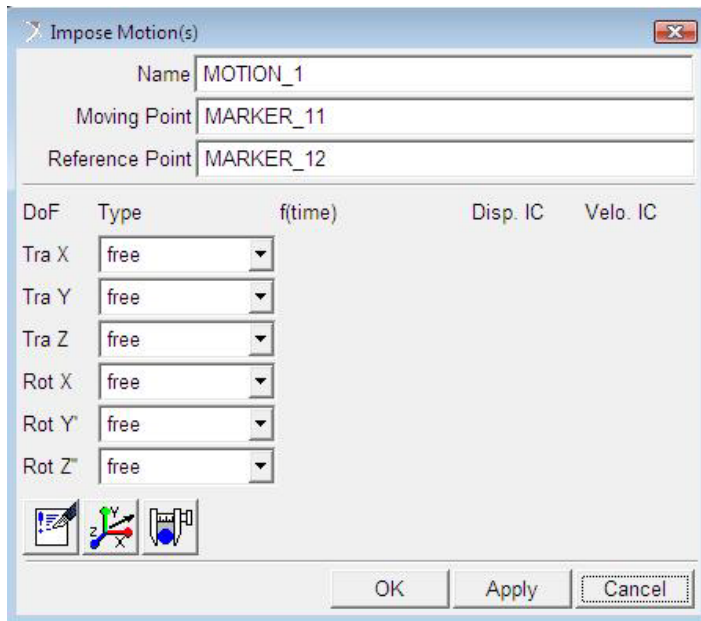


Imagen C.15. Cuadro de diálogo de actuadores.

En él se podrá especificar el movimiento de los seis grados de libertad: si son libres, si tienen alguna aceleración, etc.

Se podrá especificar que los actuadores sólo generen movimiento durante un intervalo de tiempo. Esto se define de la siguiente manera.

Se pulsa en el actuador para modificarlo:

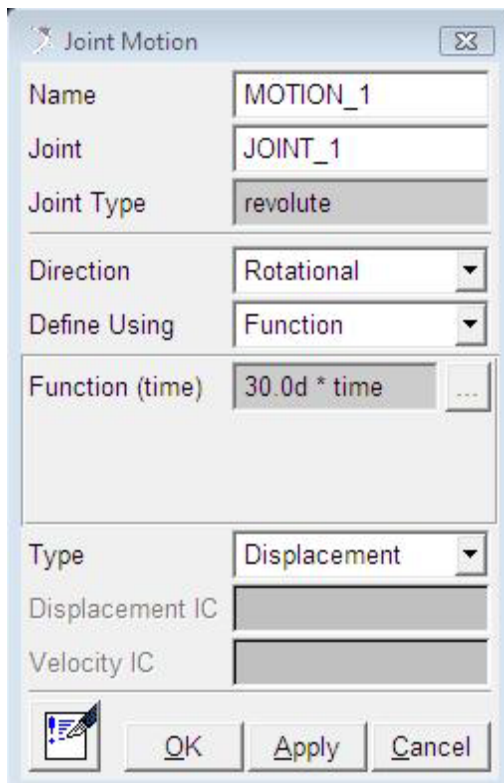



Imagen C.16. Actuador.

En el menú del actuador se puede ver dónde está aplicada, el tipo, la dirección, la función de movimiento, velocidad o aceleración. Por defecto son de traslación y dependen del tiempo. Si se desea modificar la función para variar el movimiento se puede hacer directamente en el cuadro o pinchar en .

Si se ha pulsado la opción anterior se abre un panel para construir funciones:

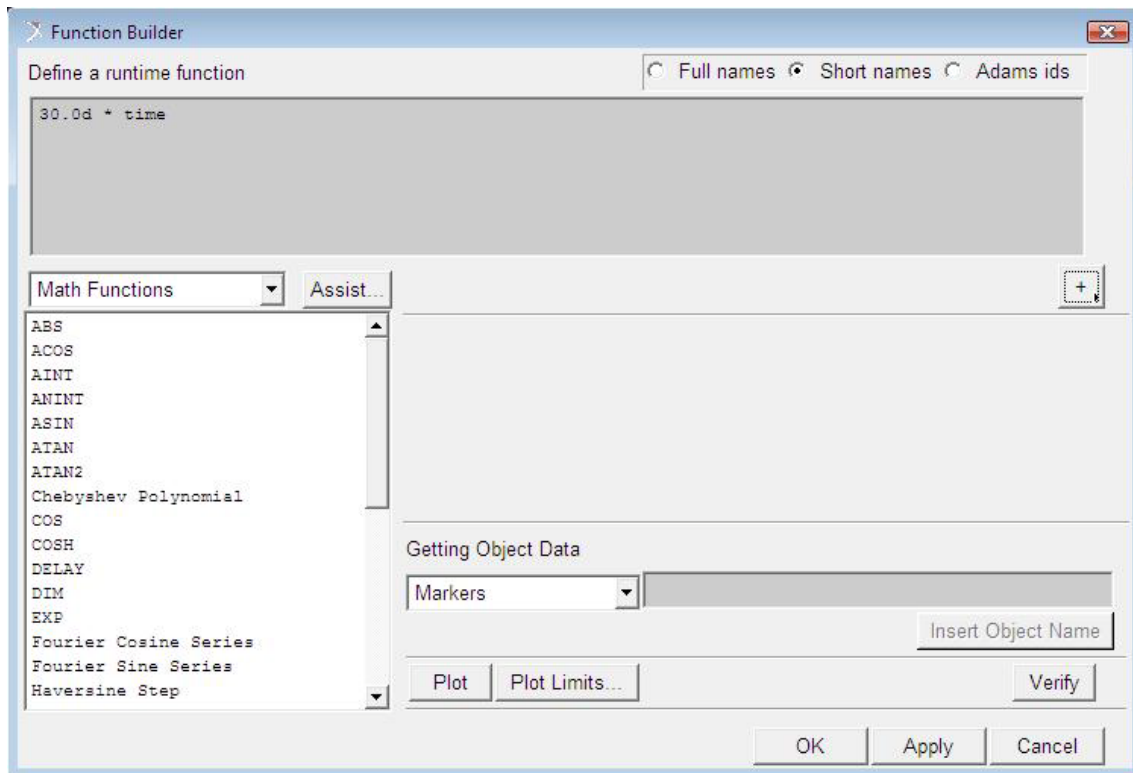


Imagen C.17. Function Builder.

En el constructor de funciones se puede ver la función “30.0d*time” donde “d” se refiere a los grados y “time” al tiempo. Si se quiere definir para que el motor sólo actúe en un intervalo se utilizará la función “IF”:

IF(time-A:B,C,D) donde:

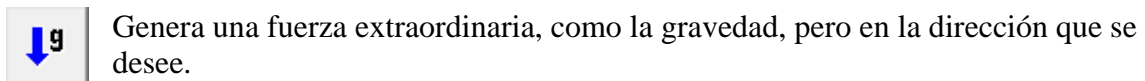
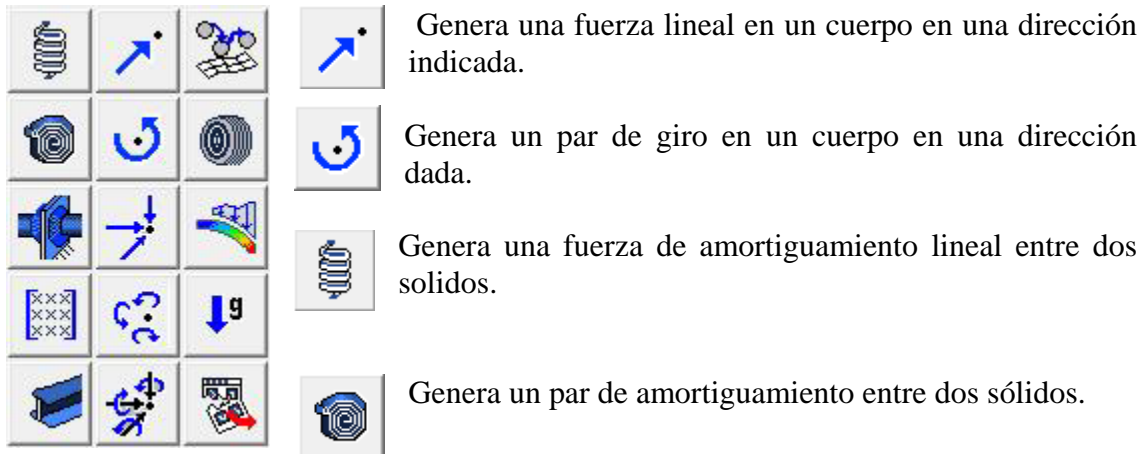
- A: tiempo para el cual está definida la acción
- B: función que debe realizar antes del tiempo A
- C: función que debe realizar durante el tiempo A
- D: función que debe realizar después del tiempo A

El motivo de escribir la segunda función restando es que debe contrarrestar a la primera para que sólo actúe en el intervalo especificado.

En este proyecto se utilizará un controlador externo sobre el que se hablará más adelante, por lo que no se dará más importancia al modo en que MSC.ADAMS resuelve este tipo de ecuaciones.

FUERZAS

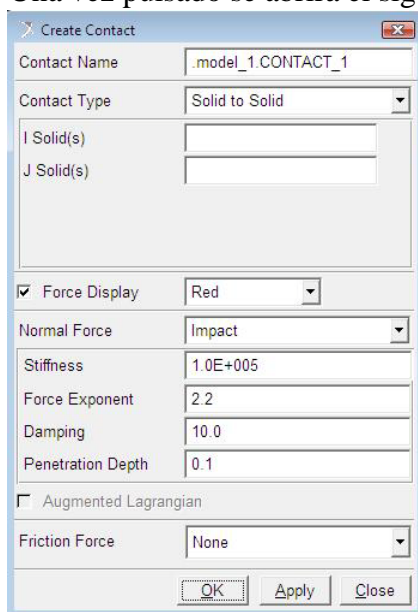
Además de los actuadores podemos aplicar fuerzas a los sólidos para que se comporten también de una determinada forma. Las fuerzas se aplicarán con el siguiente desplegable:



Una aplicación muy importante es la generación de contacto entre un sólido y otro. Por defecto, en ADAMS los objetos se intersecarán en sus movimientos relativos, sin producirse reacciones entre ellos. Para relacionar dos objetos entre sí con el fin de que surja una colisión real necesitamos usar este comando:



Una vez pulsado se abrirá el siguiente desplegable:



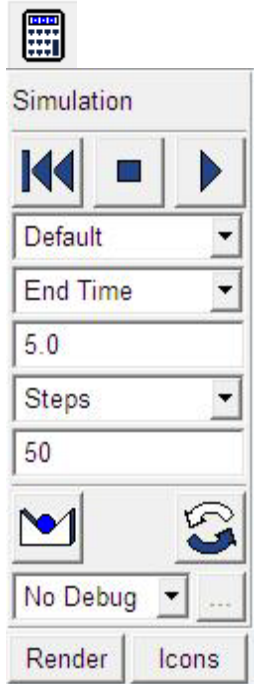
Con el botón derecho, pulsando en la primera casilla en blanco obtenemos el despliegue en el que seleccionamos “Contact_Solid > Pick”. Esto hace que podamos elegir en el espacio de trabajo nuestro sólido haciendo click sobre él. También podemos hacer doble click sobre la casilla en blanco y acceder al listado de objetos, pero resulta más difícil moverse en ella que en la representación gráfica.

Además se podrá definir el tipo de contacto y si se desea fuerza de rozamiento o no.

Imagen C.18. Creación de contacto entre piezas.

C.4. Simulación del modelo

Una vez diseñado el modelo se procede a su simulación. Para ello se utiliza el siguiente icono, transformándose la barra de tareas en la que aparece a continuación:



Antes de simular conviene comprobar el equilibrio estático para ver si se ajusta a lo esperado. El equilibrio se comprueba con:



Para simular se define el tiempo (duración) y los pasos de simulación. Para una simulación corta y relativamente fiable con unos 100 pasos por segundo basta. Si se quiere refinar se introducirán entre 500 y 1000 pasos por segundo.

Durante la simulación se aprecian los posibles errores del diseño, de forma que el mecanismo se comporte de manera inesperada o que surjan errores, resolverlos y volver a simular de nuevo.

Imagen C.19. Panel de simulación.

Los iconos que tenemos en la simulación son los siguientes:



Inicia la simulación



Detiene la simulación en un momento dado



Reinicia las condiciones iniciales de la simulación. Es imprescindible usarlo para volver a simular



Repite la última simulación realizada

Animación del modelo

Una vez simulado el modelo se puede visualizar con:



Pulsando sobre “Review > Animation Controls” la barra de tareas queda de la manera siguiente:

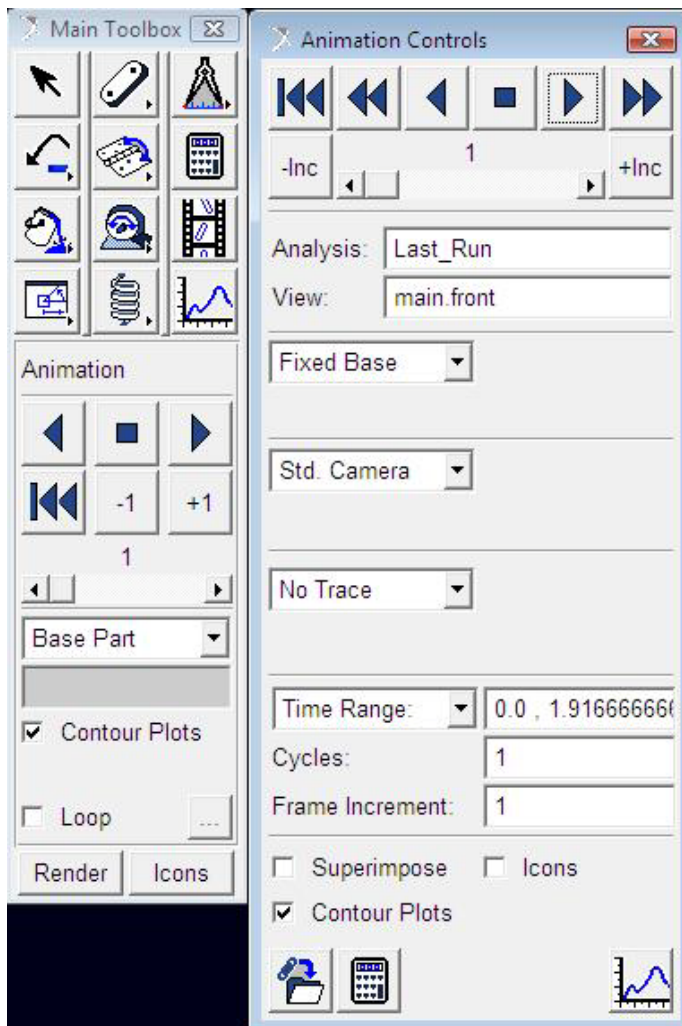


Imagen C.20. Controles de la animación.

Con los iconos que aparecen se puede reproducir la animación, parar, reproducir en sentido inverso y reiniciar. Además, si se marca la pestaña “loop” la animación se reiniciará automáticamente cuando acabe.

Se podrá utilizar una cámara móvil que siga uno de los sólidos o markers, generar una traza que describa el movimiento de un marker, variar el rango del tiempo de reproducción o aumentar la velocidad de reproducción usando “frame increment” con un valor mayor que uno.

Toma de medidas

Para la toma de medidas es imprescindible hacer primero un simulado.

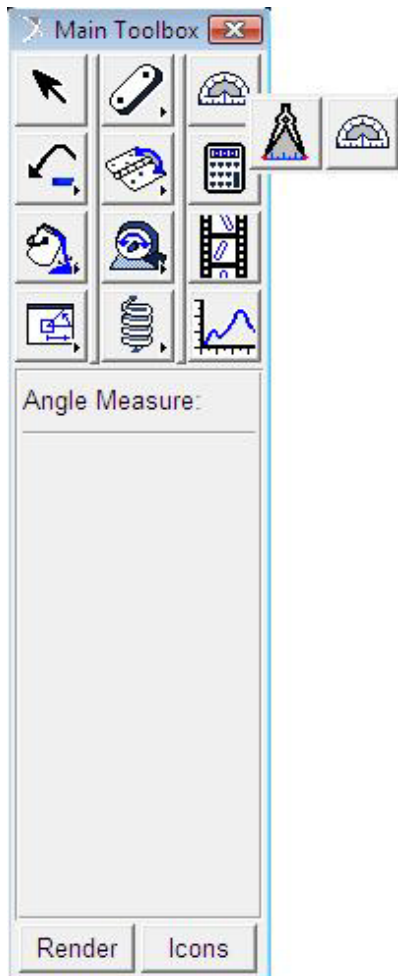


Imagen C.21. Main Toolbox.

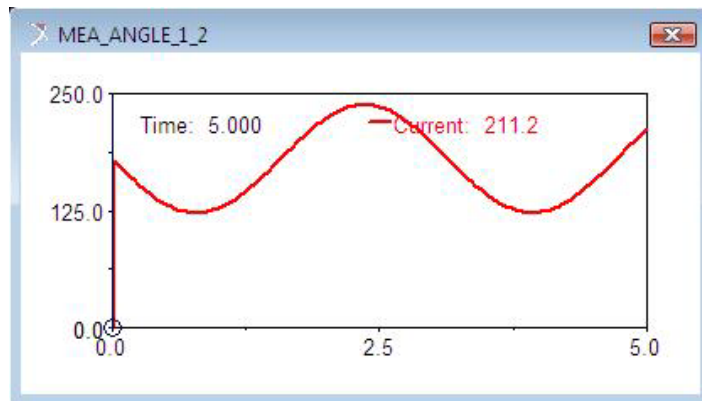


Imagen C.22. Medida de un ángulo en función del tiempo.

De una manera elemental se pueden medir ángulos, desplazamientos, velocidades y aceleraciones lineales entre dos sólidos utilizando los iconos que se muestran desplegados en el panel de la izquierda.

Otra forma de obtener medidas es utilizar los markers y las juntas para medir directamente sobre ellos. Para ello se seleccionará el marker o la junta y con el botón derecho se seleccionará “Measure”, mediante el cuál se podrá obtener, según el sistema de coordenadas (cartesiano, cilíndrico o esférico) multitud de medidas de diferentes parámetros, como desplazamientos, posición respecto a diferentes ejes, velocidades, aceleraciones, fuerzas, pares de giro, etc.

C.5. Postprocesador

Para finalizar se explicará brevemente el postprocesador de datos y cómo exportar los mismos. El postprocesador es una herramienta de ADAMS.MSC llamada “Adams Postprocessor” que permite un estudio detallado de los resultados que se han obtenido mediante las simulaciones. Además permite visualizar también animaciones para su posterior exportación.

Se puede acceder a él mediante el acceso directo o directamente desde ADAMS View de una manera más cómoda siguiendo los pasos siguientes:

Cuando se toma una medida de cualquier tipo se pulsará sobre ella con el botón derecho y se seleccionará “Transfer To Full Plot”. Una vez hecho se abrirá el posprocesador directamente. Todo lo que se guarde de esta forma a partir de ahora quedará guardado en la misma base de datos que estemos utilizando, de manera que siempre que esté la base de datos abierta en la cual se esté trabajando se podrá acceder directamente al posprocesador haciendo click sobre el siguiente botón:



Se podrá volver a ADAMS cerrando la ventana o pulsando

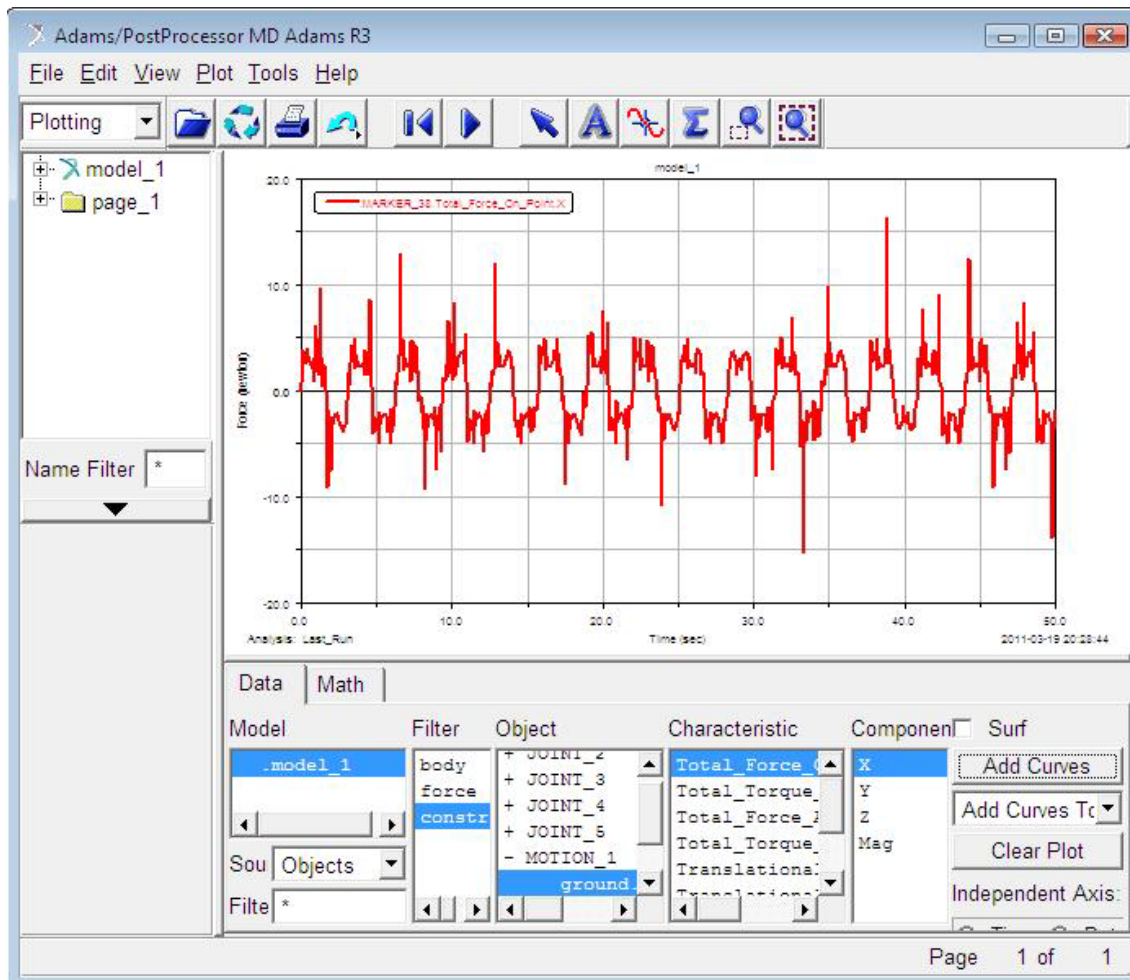


Imagen C.23. Postprocesador

Para exportar datos se seleccionará “File > Export > Table”. Aparecerá entonces el siguiente cuadro donde se definirá el nombre del archivo y la serie de datos que se desea exportar. Para ello, tal y como se muestra a continuación, se hace click directamente sobre el gráfico:

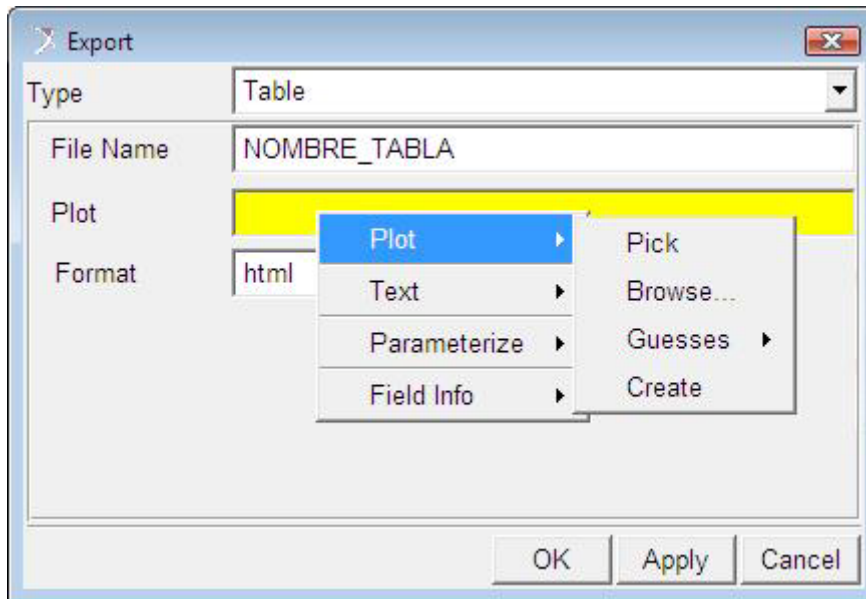


Imagen C.24. Exportación de datos y archivos

Es importante antes de aceptar, haber elegido una carpeta de destino, que será en principio la que se definió al iniciar el nuevo modelo. Si no se conoce se elegirá en “File > Select Directory”.

Para cargar animaciones, se pulsará con el botón derecho en cualquier parte de la gráfica y se seleccionará “Load Animation”, cargándose automáticamente la animación. Ahora se podrá reproducir, con el cuadro que se muestra, cambiar vídeos para su exportación, lo que se hará de la siguiente forma:

Primero, en “File Name” se seleccionará el nombre de la animación y se definirá la calidad de la misma. Se pulsará el icono de grabar y posteriormente, el play.

El archivo se grabará en la carpeta seleccionada por defecto en formato AVI.



Imagen C.25. Grabación de animaciones

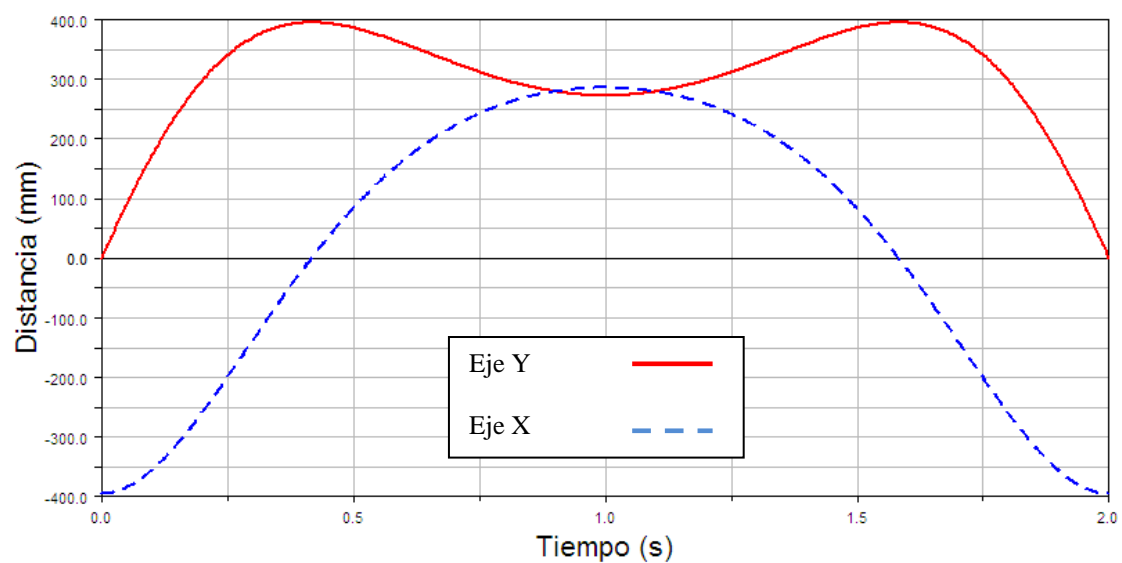
ANEXO D. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Una vez simulado obtenemos las siguientes respuestas del sistema ADAMS-MATLAB.

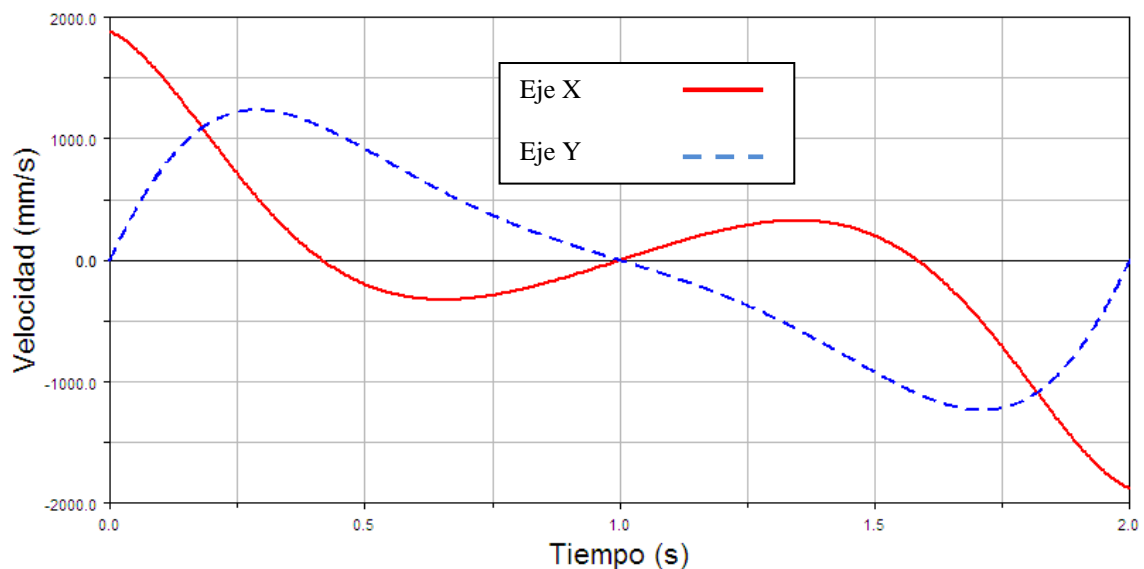
D.A. Flexoextensión del codo. Brazo en posición vertical.

Se ha estudiado este caso como si el codo fuese un punto fijo en el espacio.

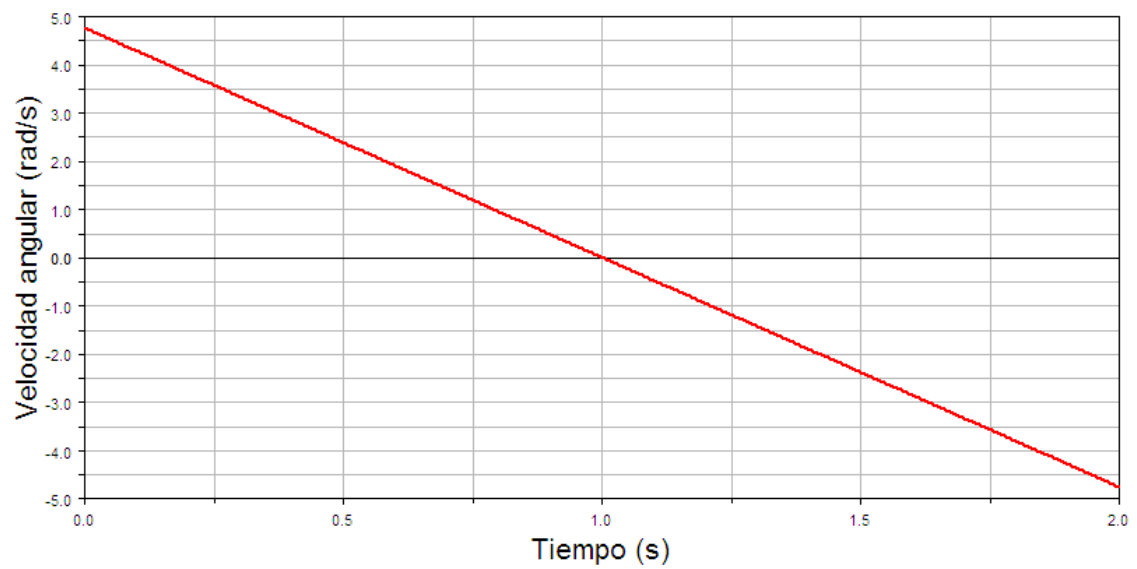
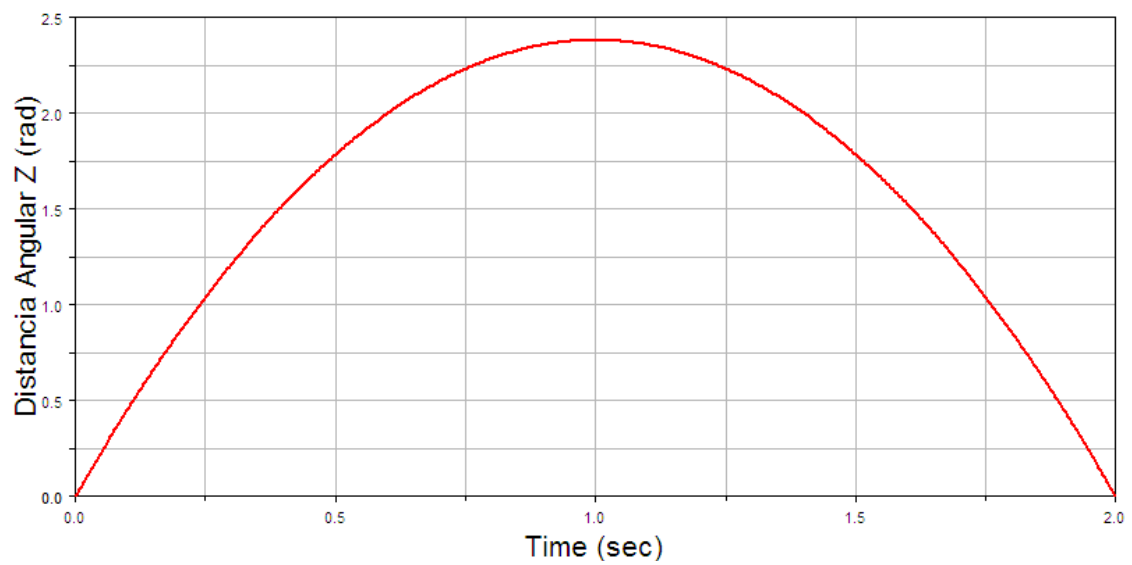
D.A.1. Cinemática

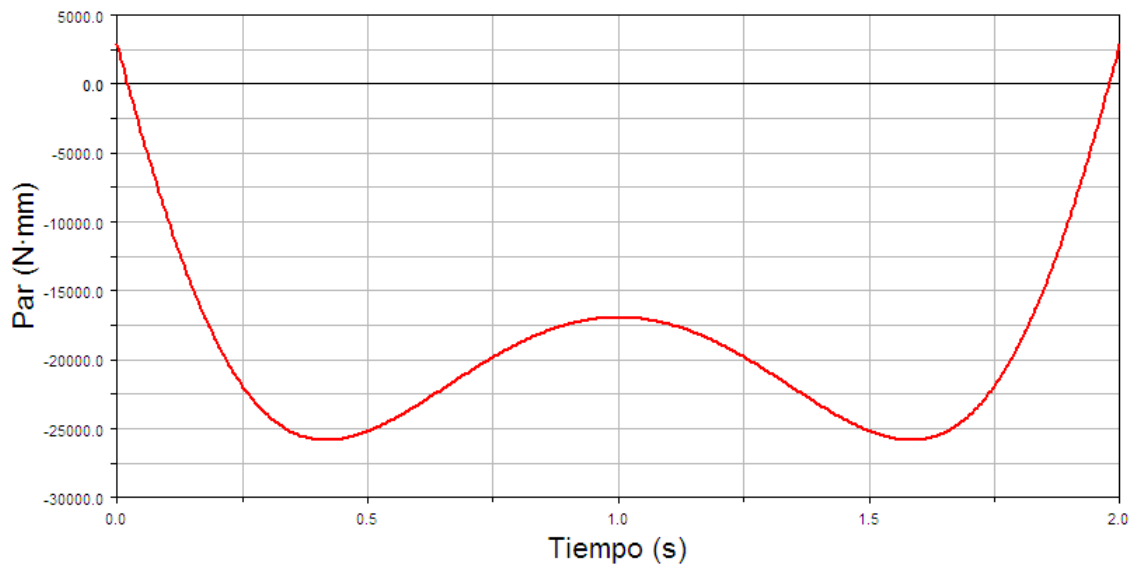
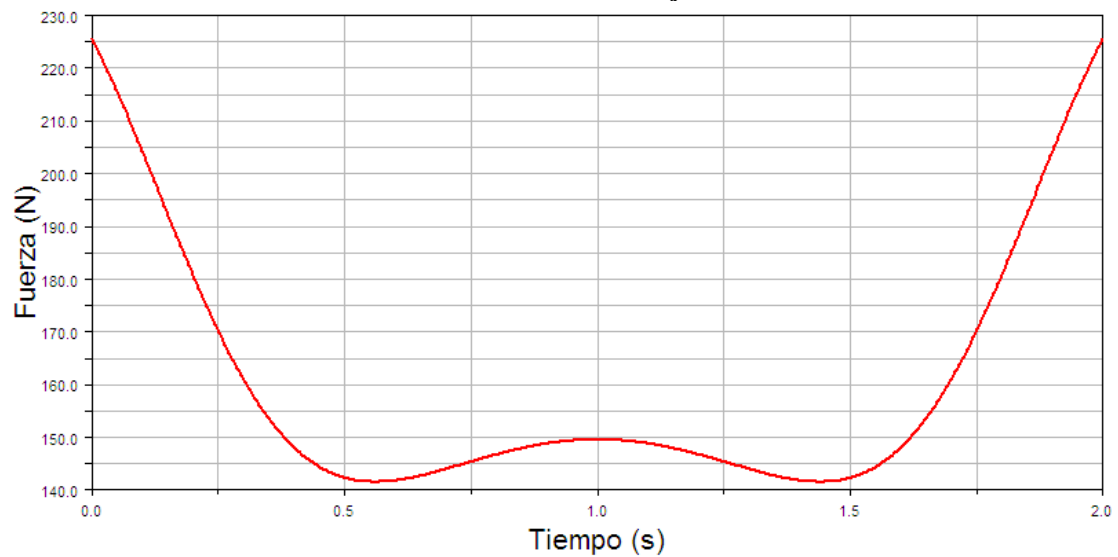


Gráfica D.1. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal.



Gráfica D.2. Proyecciones sobre los ejes coordenados de la velocidad lineal.



D.A.2. Dinámica.**Gráfica D.5. Par motor sobre el eje Z del codo.****Gráfica D.6. Fuerza sobre el codo.**

D.A.3. Consumo energético.

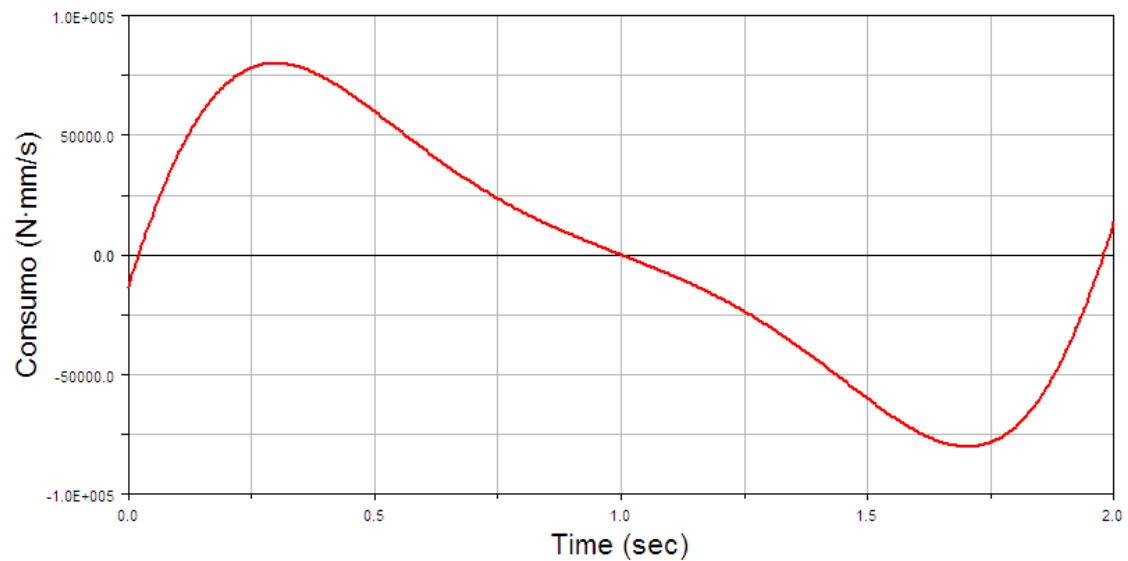
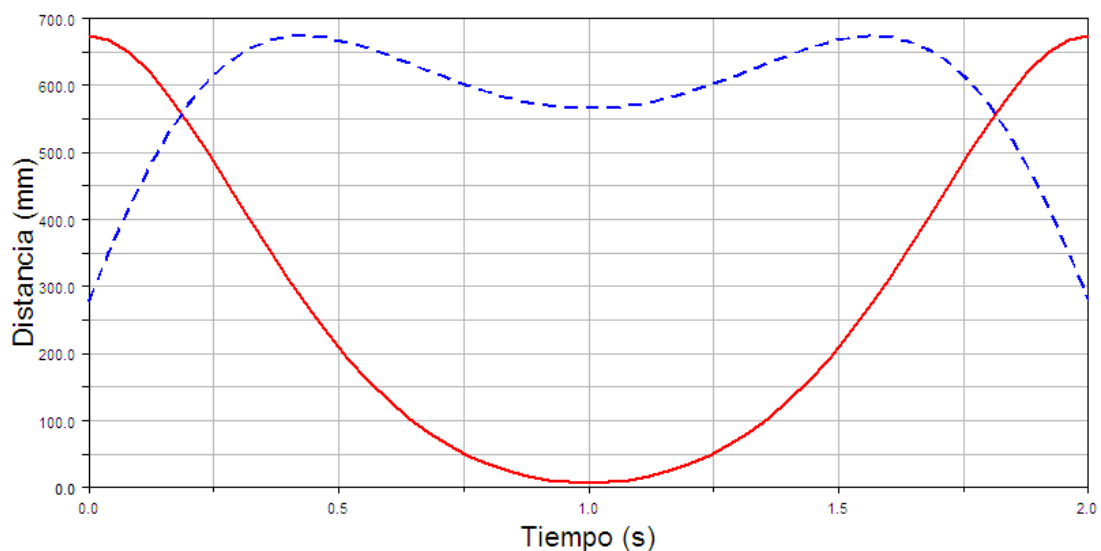


Imagen D.7. Consumo energético del motor.

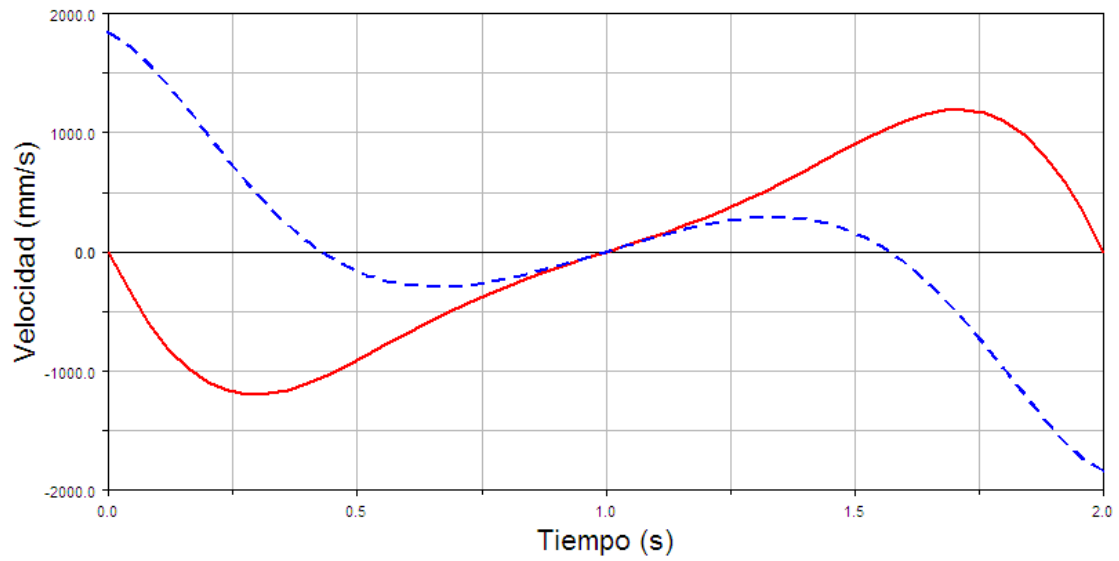
D.B. Flexoextensión del codo. Brazo en posición horizontal

Para esta simulación, al igual que la anterior, se considerará el hombro fijo en el espacio.

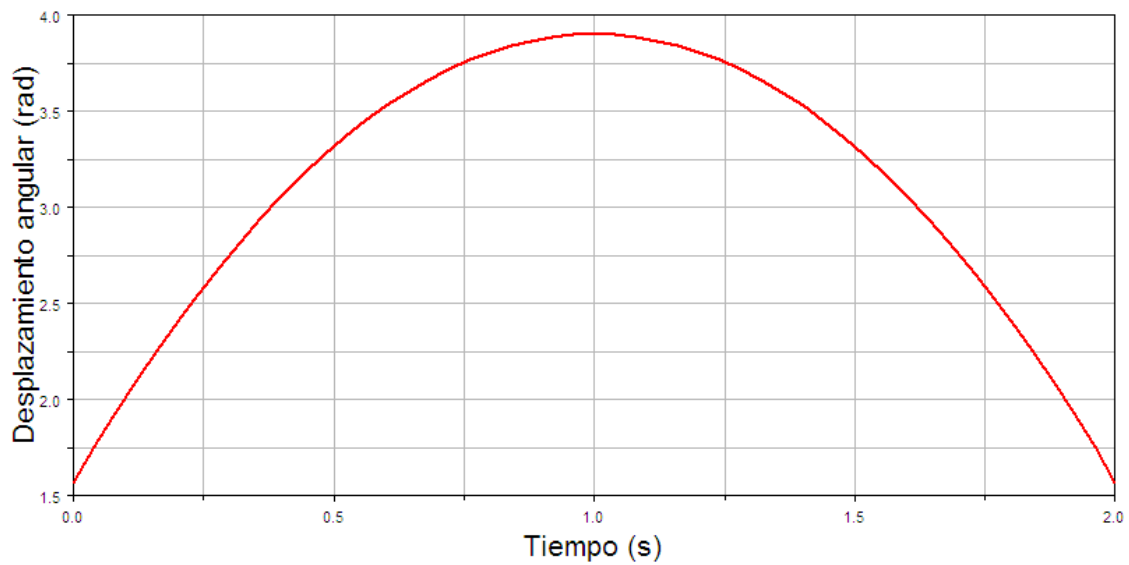
D.B.1. Cinemática



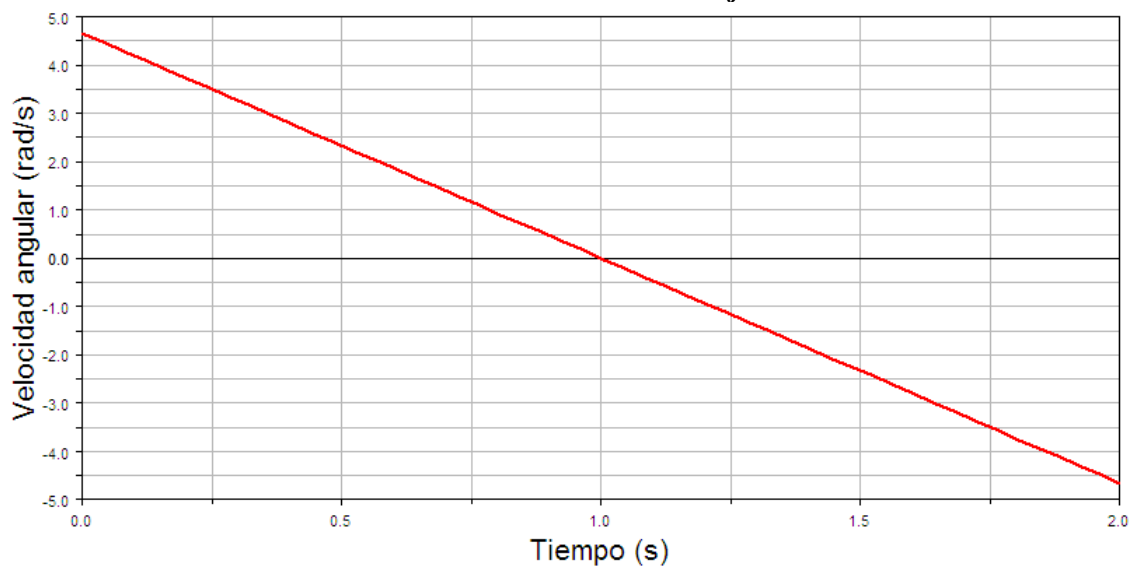
Gráfica n D.8. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal.



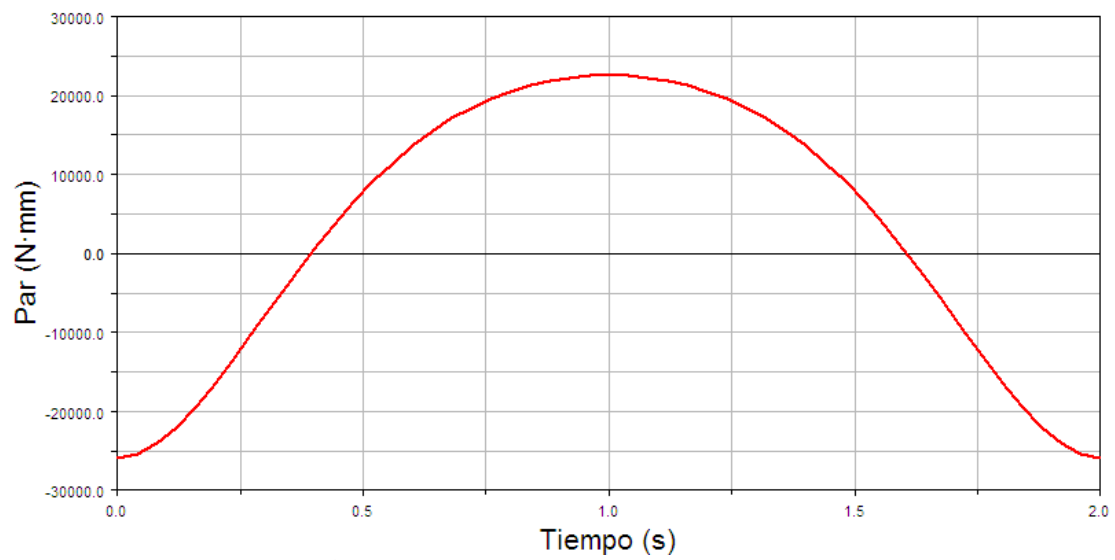
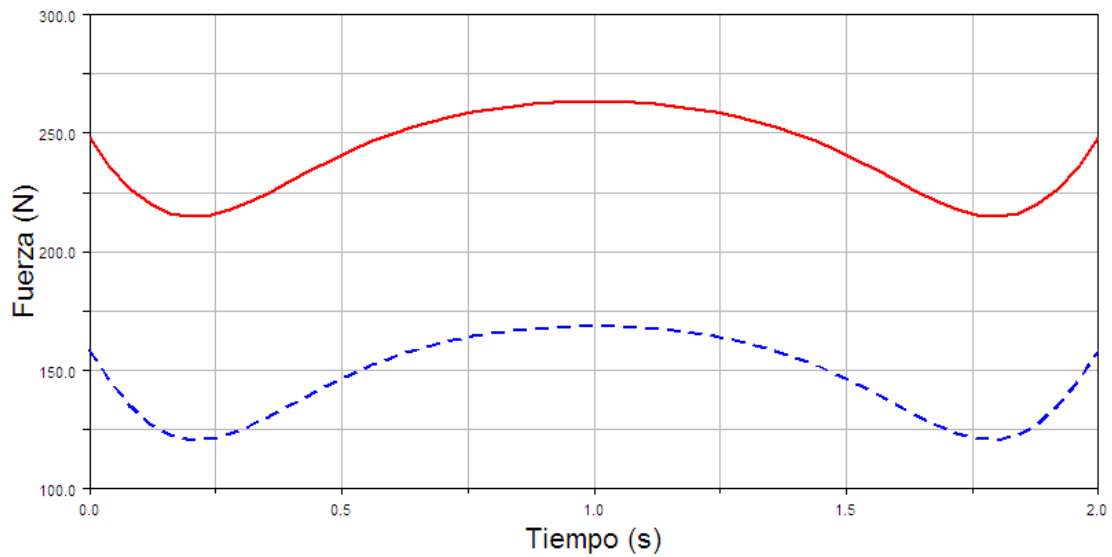
Gráfica D.9. Proyecciones sobre los ejes coordenados de la velocidad lineal.



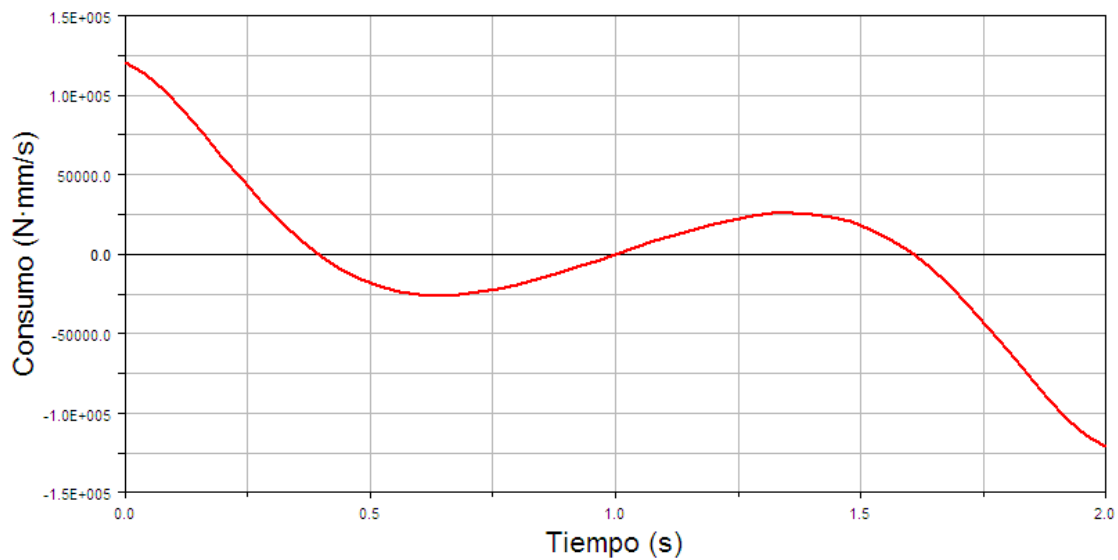
Gráfica D.10. Rotación sobre el eje Z.



Gráfica D.11. Velocidad angular en Z.

D.B.2. Dinámica.**Gráfica D.12. Par motor sobre el eje Z del codo.****Gráfica D.13. Fuerza sobre el codo.**

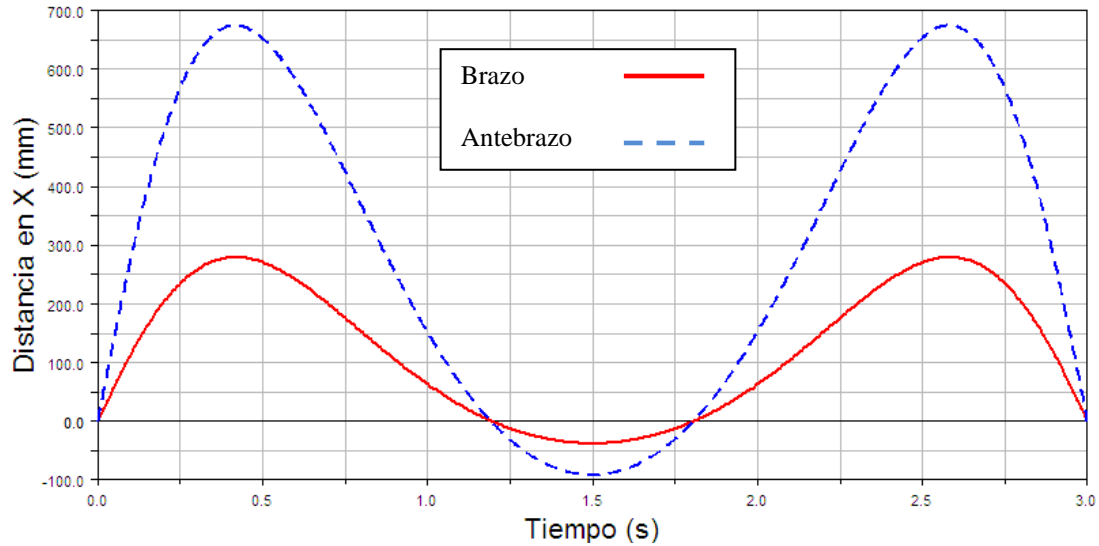
D.B.3. Consumo energético.



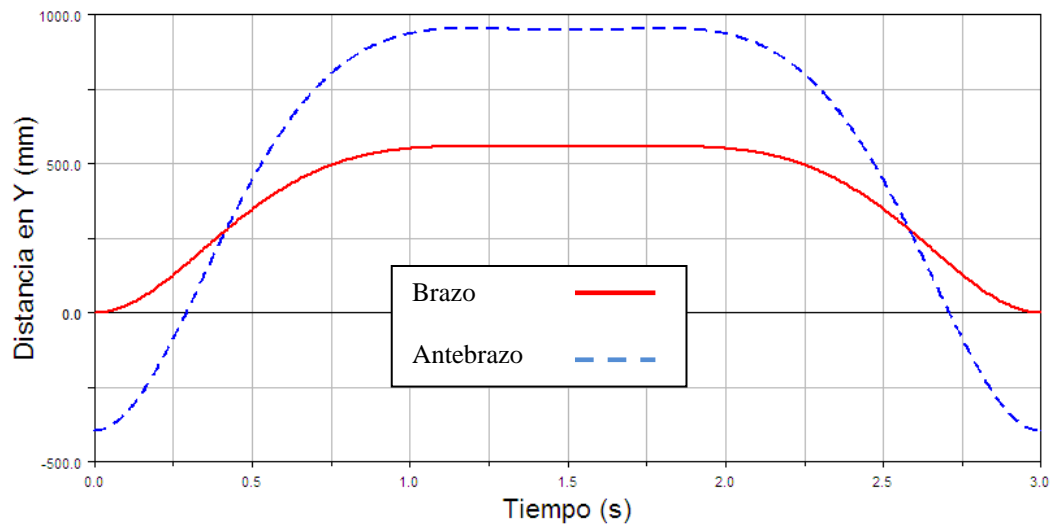
Gráfica D.14. Consumo energético de los motores.

D.C. Flexoextensión del hombro. Brazo en posición vertical

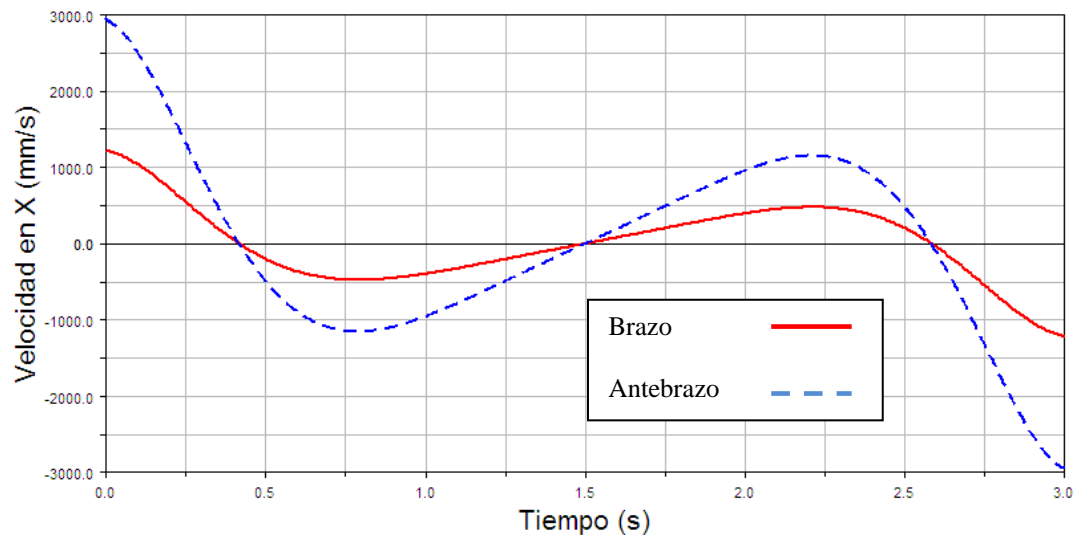
D.C.1. Cinemática



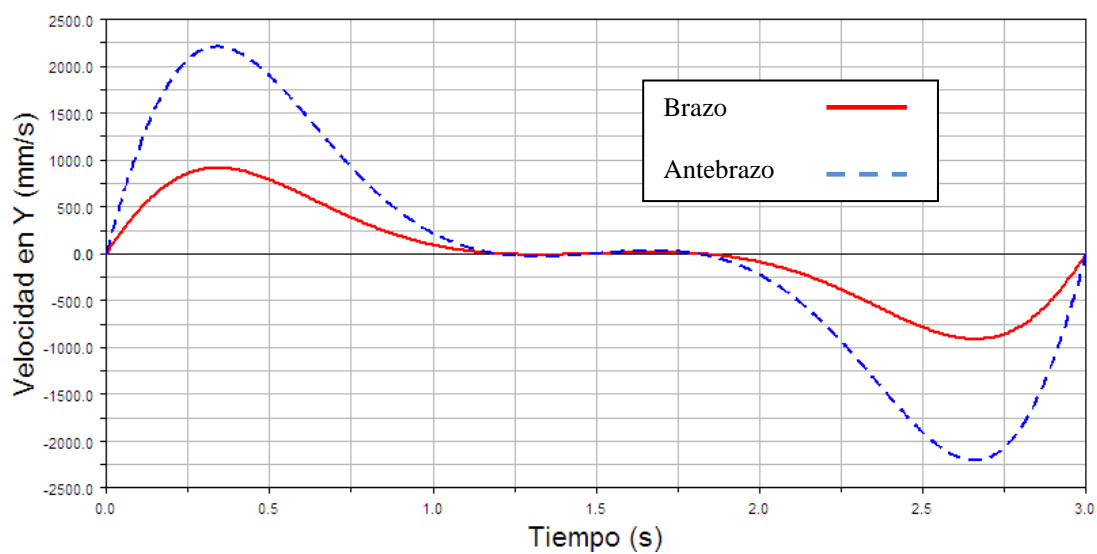
Gráfica D.15. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal en X.



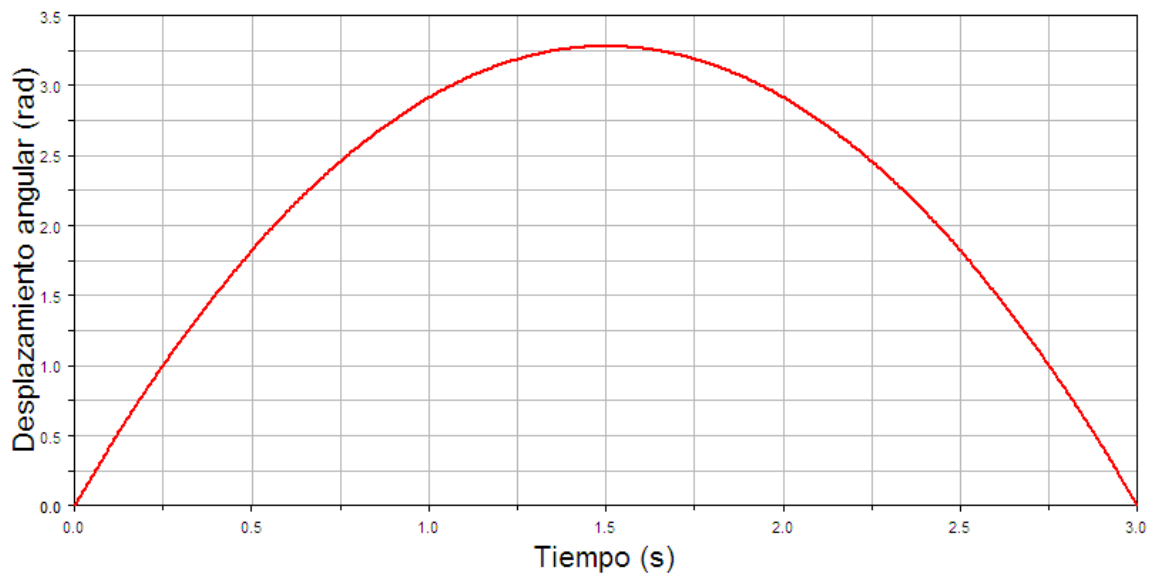
Gráfica D.16. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal en Y.



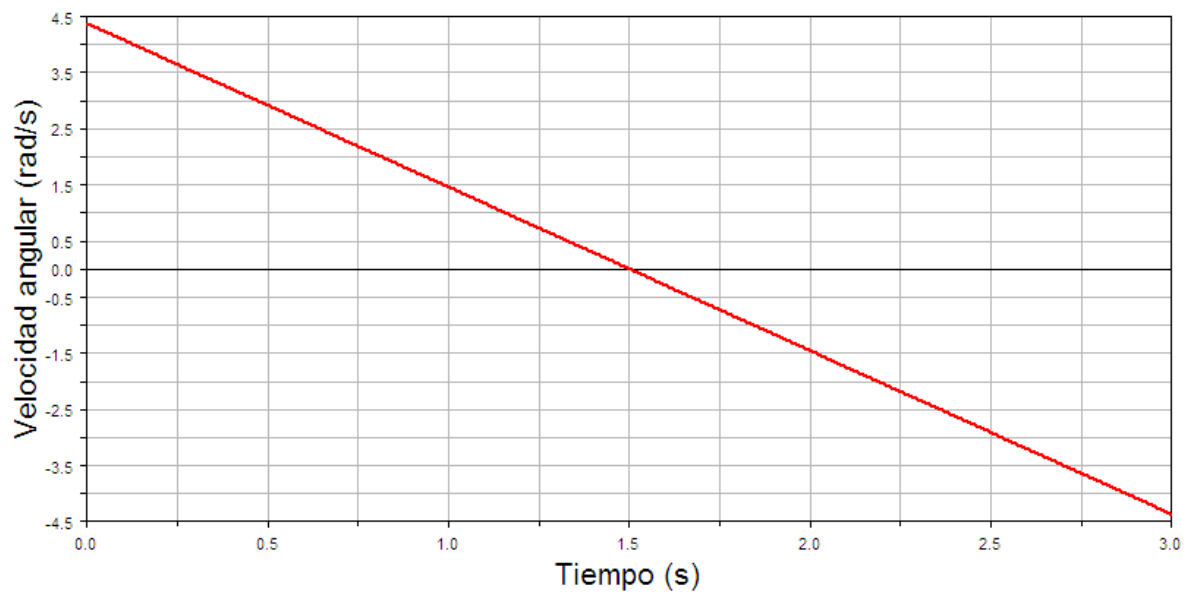
Gráfica D.17. Proyecciones sobre los ejes coordenados de la velocidad lineal en X.



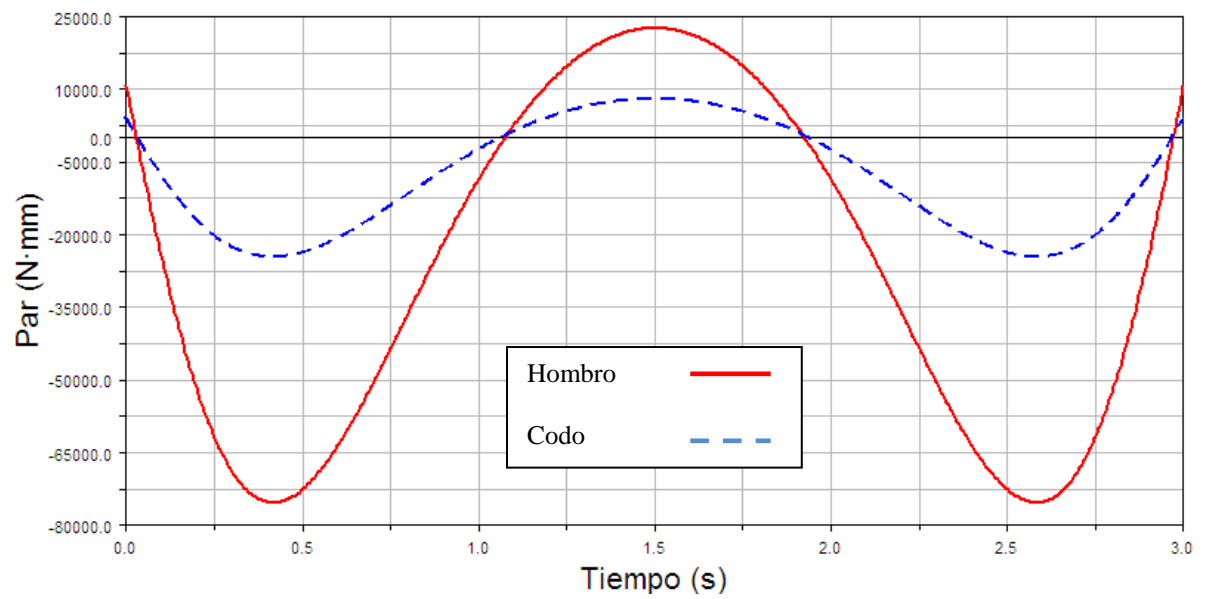
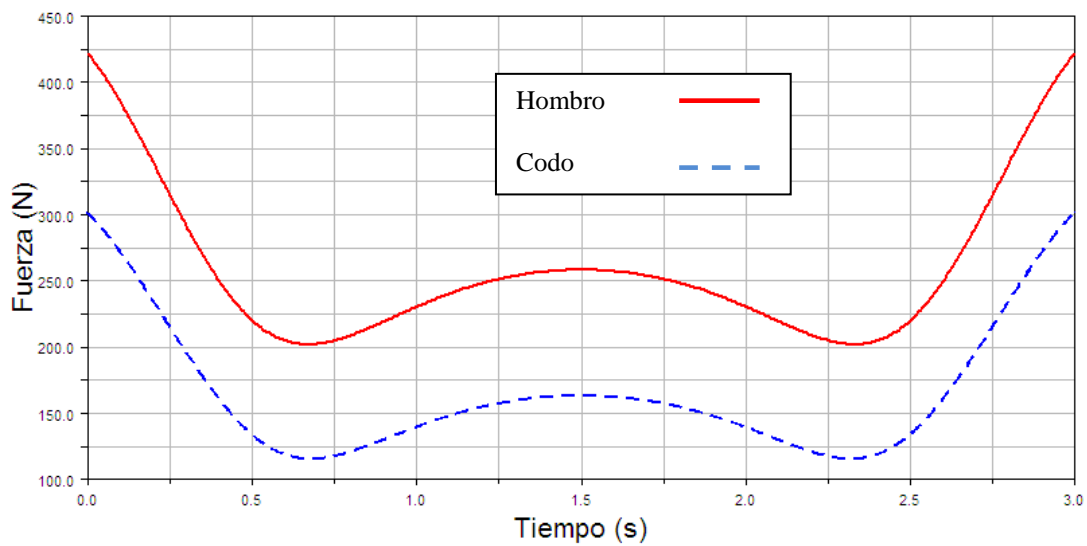
Gráfica D.18. Proyecciones sobre los ejes coordenados de la velocidad lineal en Y.



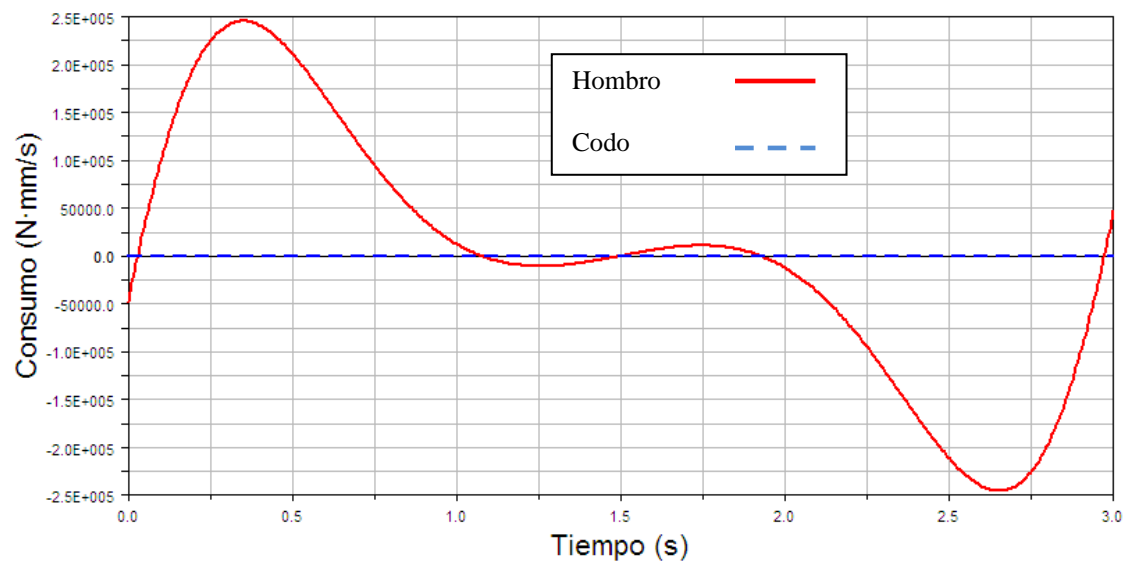
Gráfica D. 19. Rotación sobre el eje Z, antebrazo y brazo solidarios.



Gráfica D.20. Velocidad angular en Z, antebrazo y brazo solidarios.

D.C.2. Dinámica.**Gráfica D.21. Par motor sobre el eje Z.****Gráfica D.22. Fuerza sobre las articulaciones.**

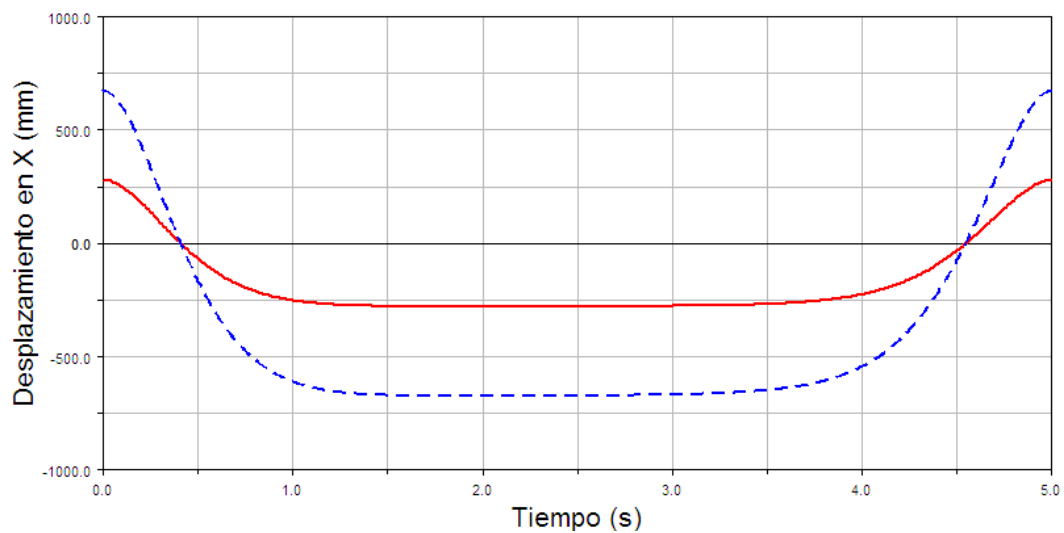
D.C.3. Consumo energético.



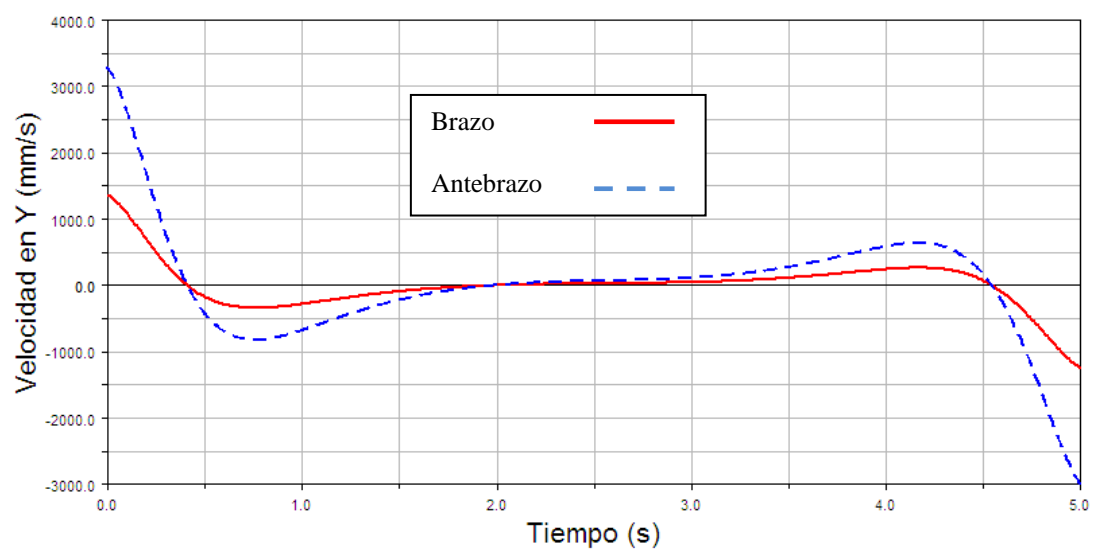
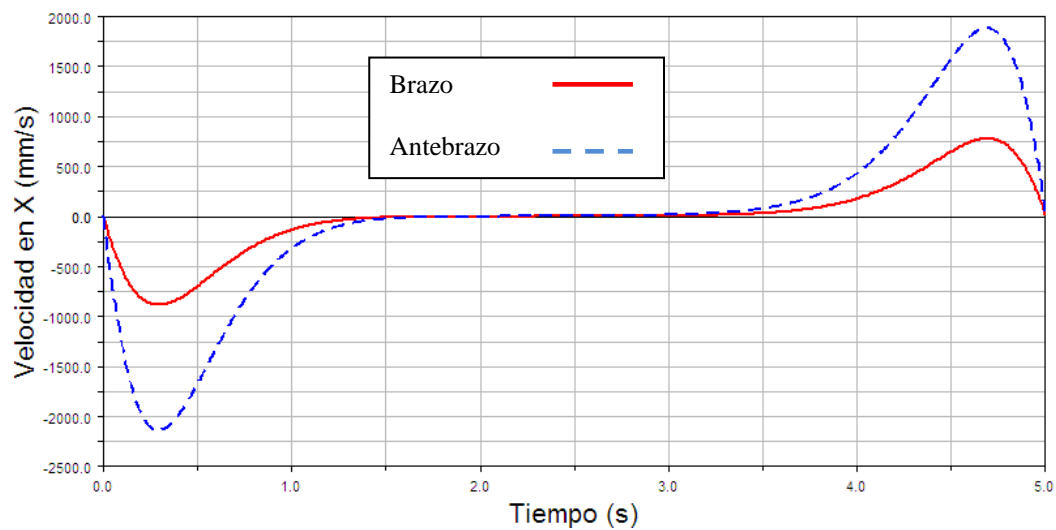
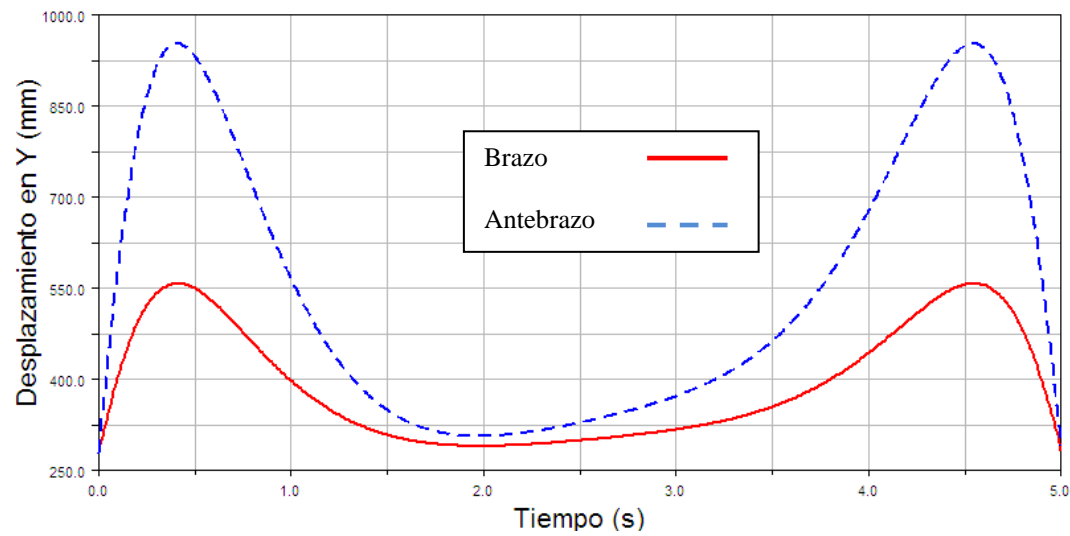
Gráfica D.23. Consumo energético de los motores.

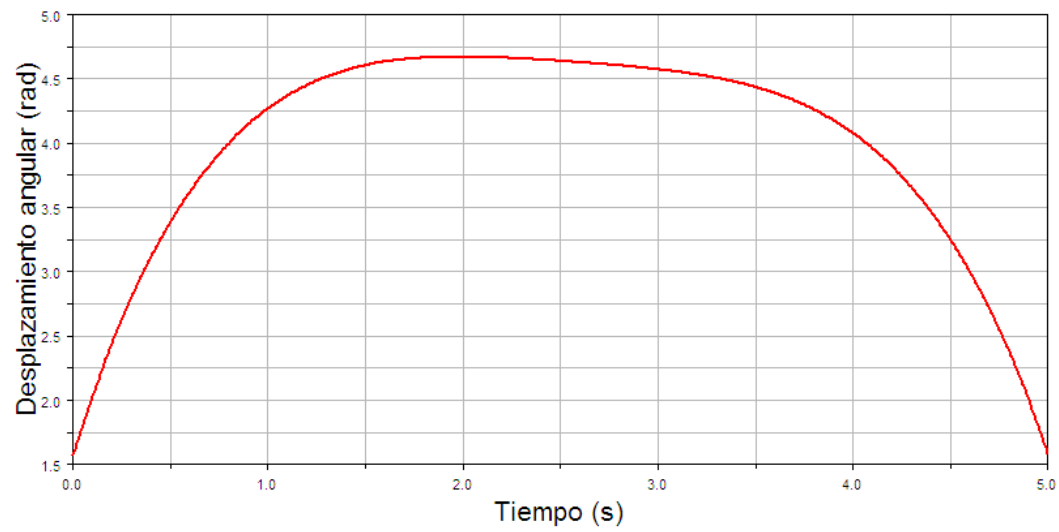
D.D. Flexoextensión del hombro. Brazo en posición horizontal.

D.D.1. Cinemática

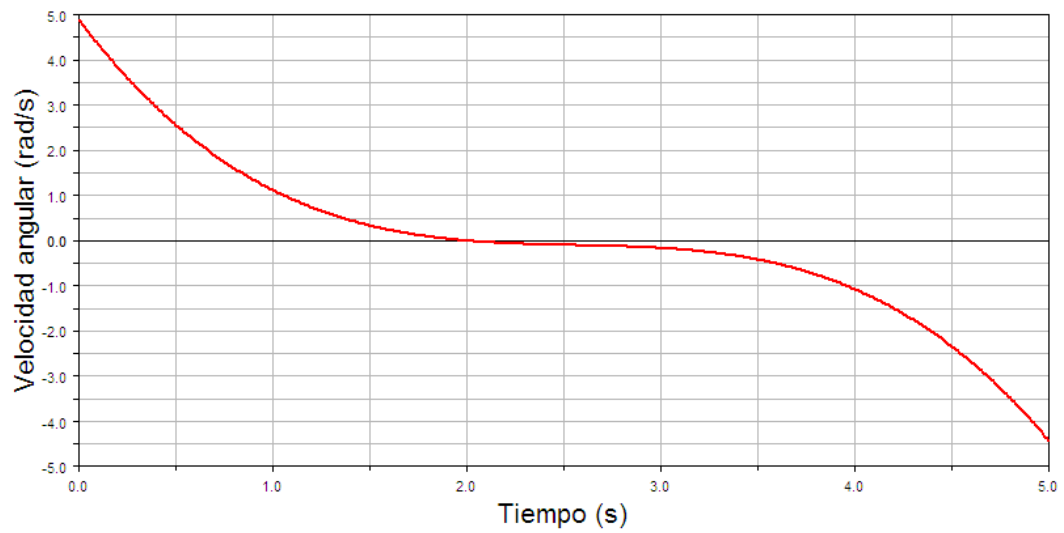


Gráfica D.24. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal en X.



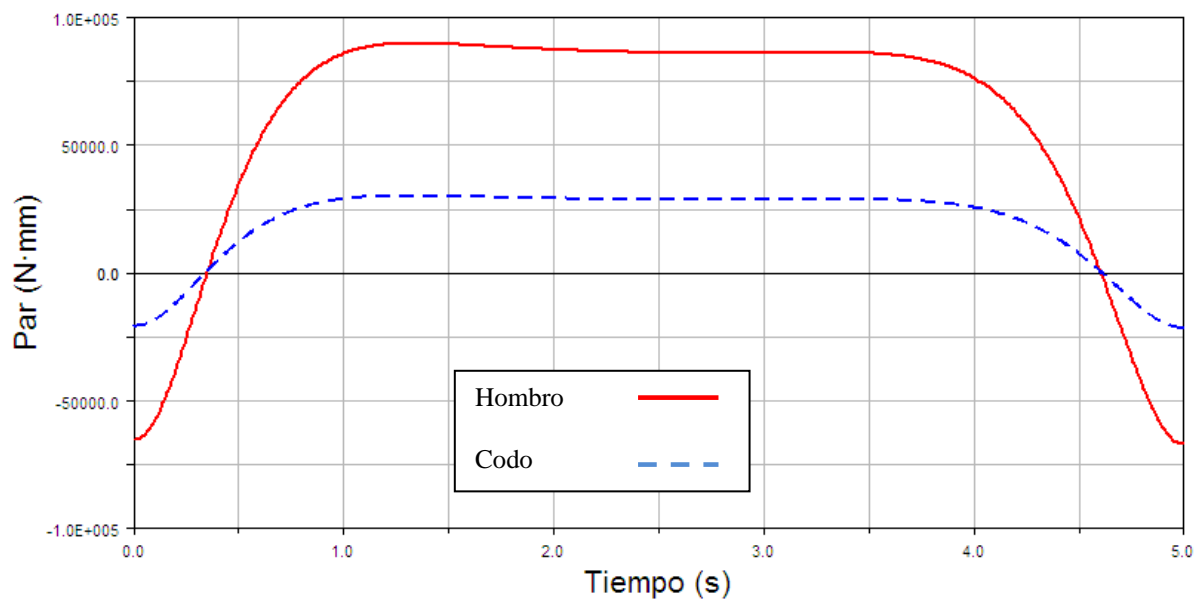


Gráfica D.27. Rotación sobre el eje Z, antebrazo y brazo solidarios.

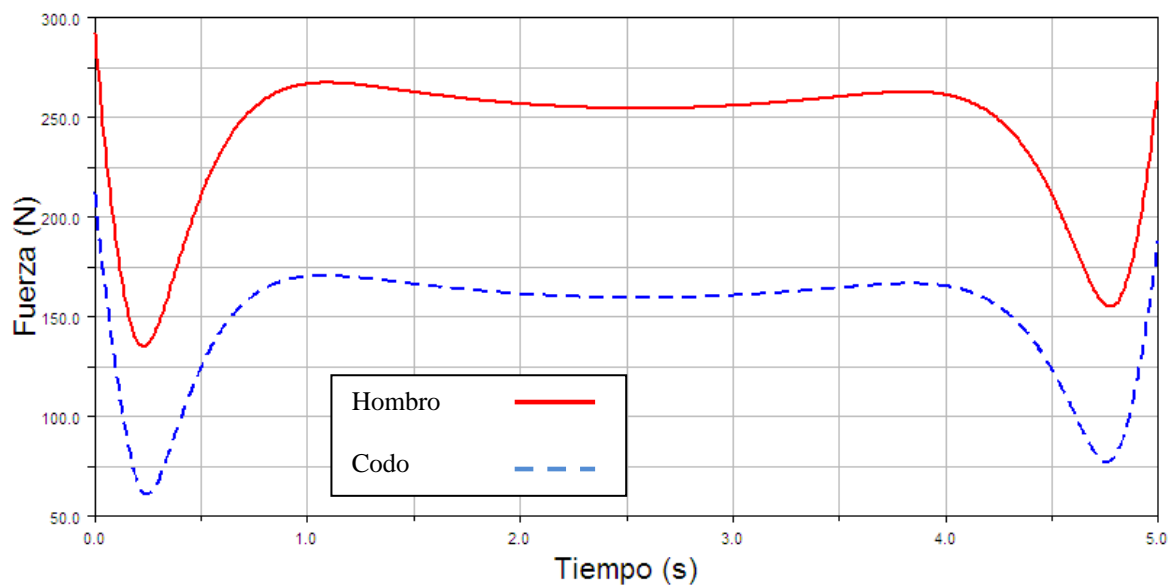


Gráfica D.28. Velocidad angular en Z, antebrazo y brazo solidarios.

D.D.2. Dinámica.

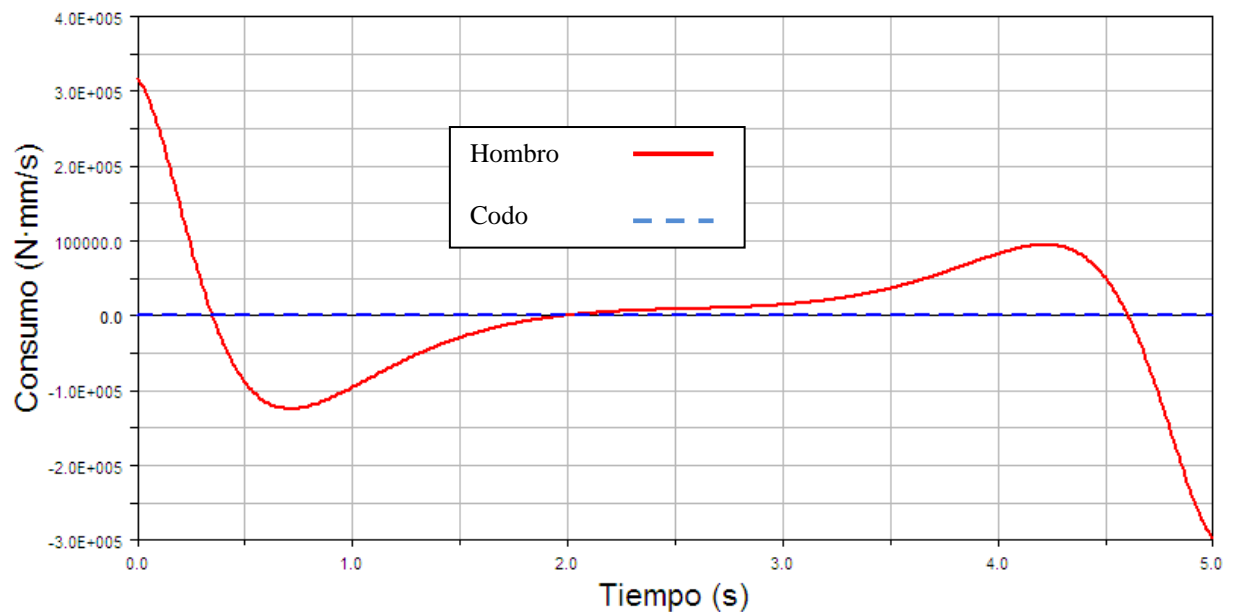


Gráfica D.29. Par motor sobre el eje Z.



Gráfica D.30. Fuerza sobre las articulaciones.

D.D.3. Consumo energético.

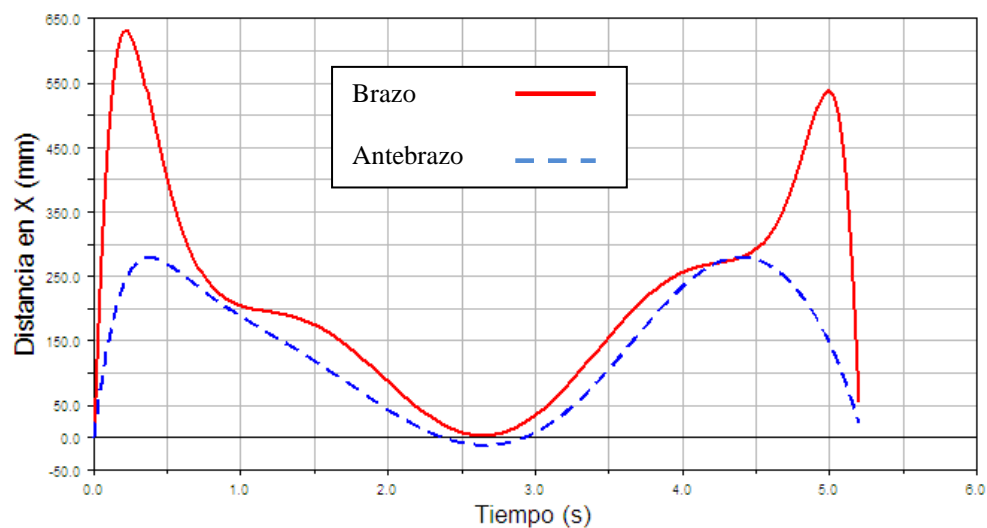


Gráfica D.31. Consumo energético de los motores.

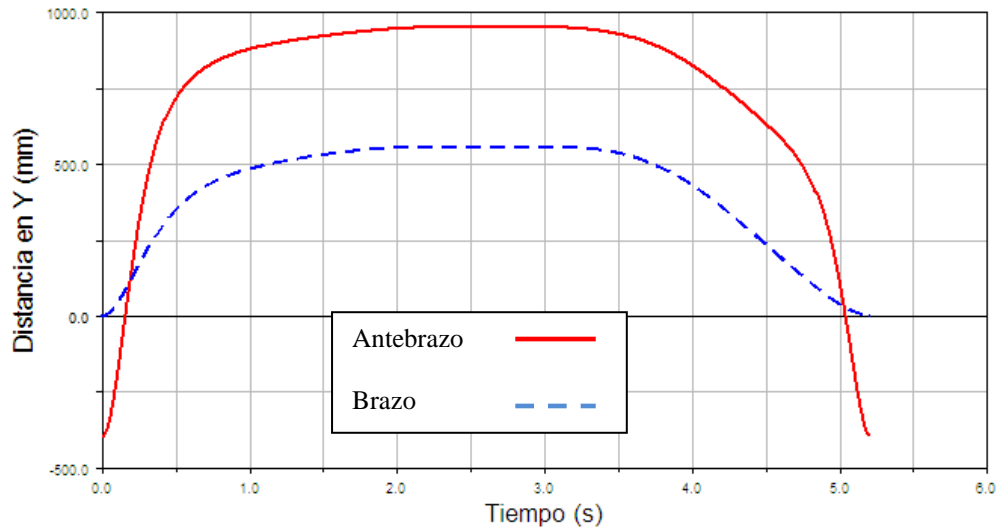
D.E. Elevación del brazo.

Las medidas han sido tomadas en los extremos de los sólidos “antebrazo” y “brazo”.

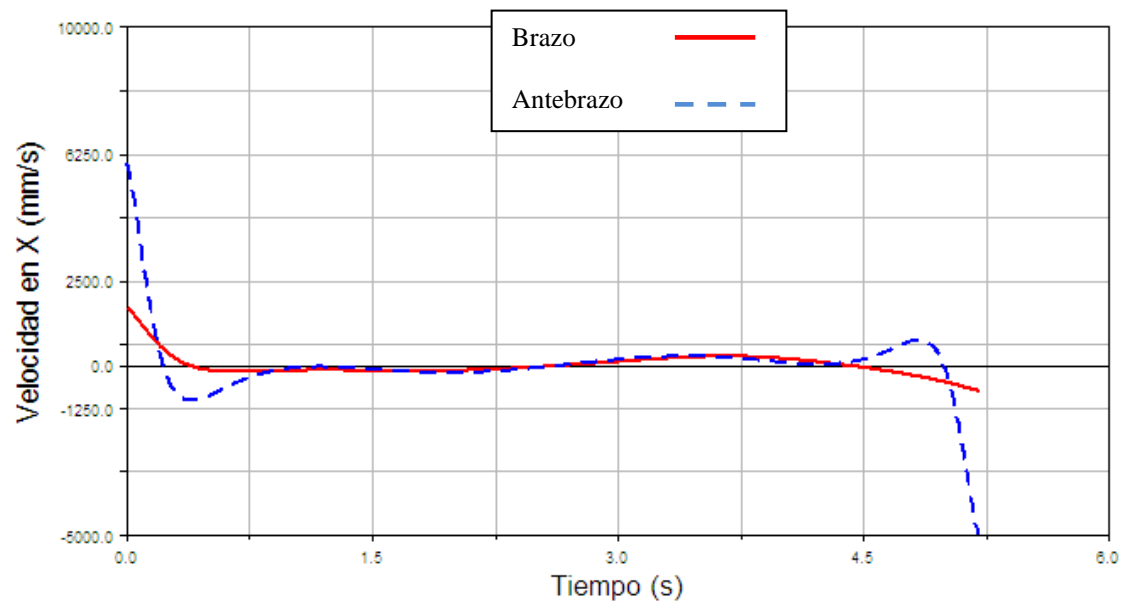
D.E.1. Cinemática



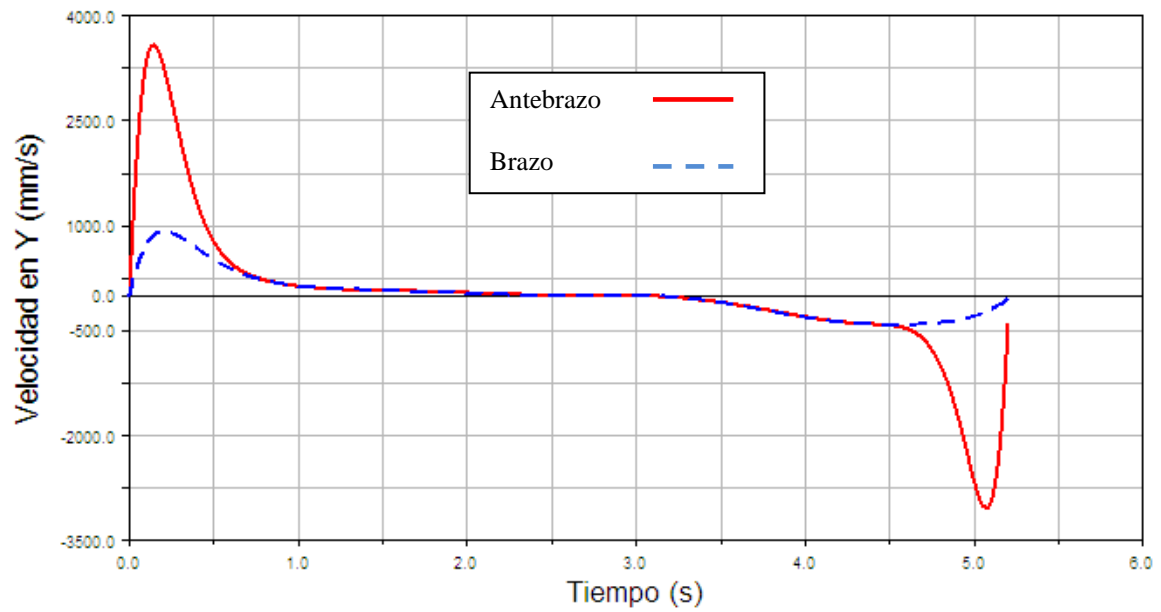
Gráfica D.32. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal en X.



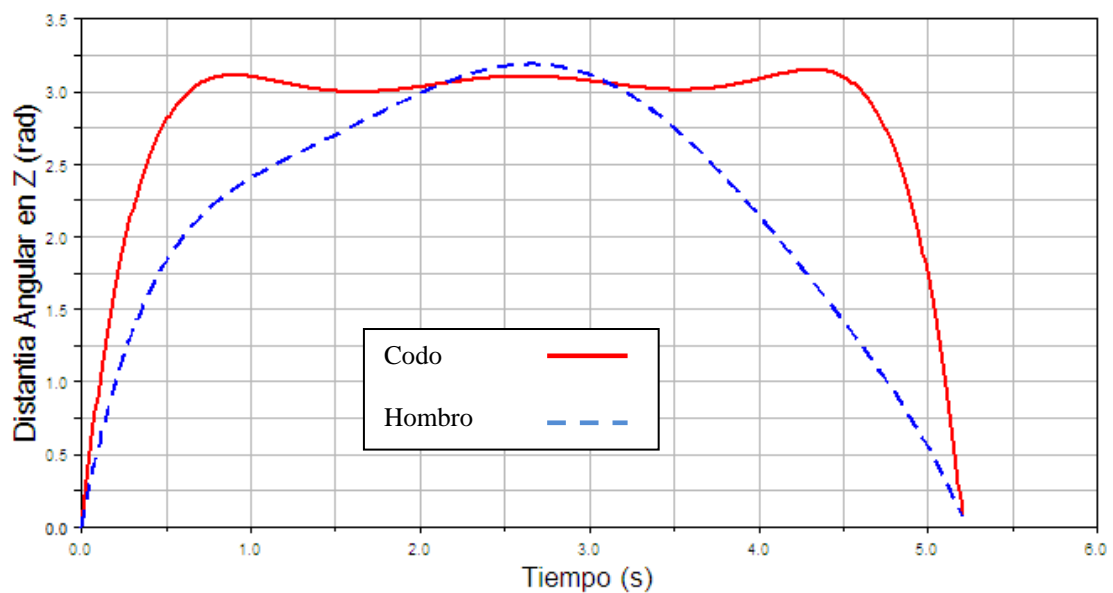
Gráfica D.33. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal en Y.



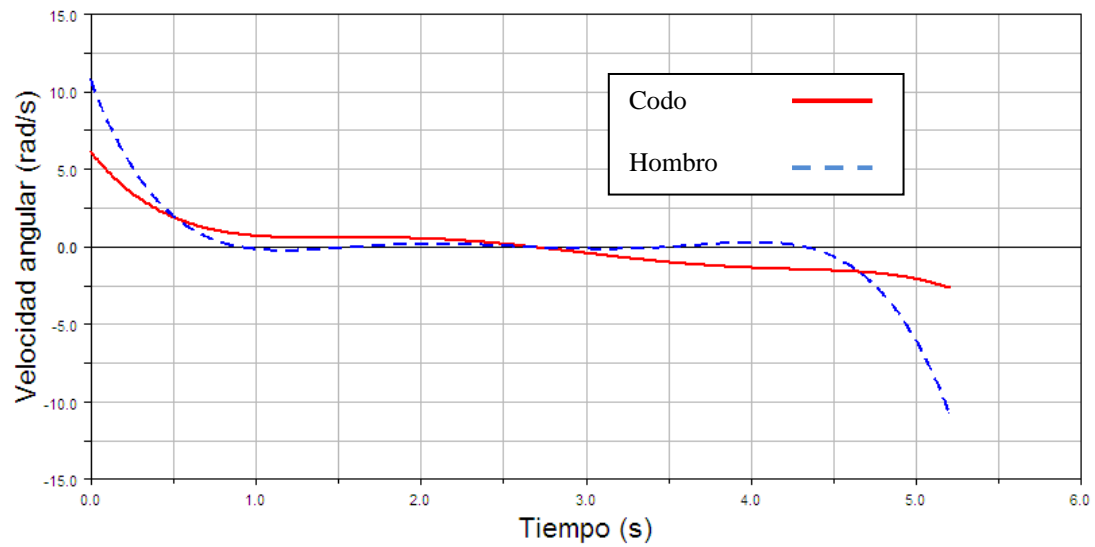
Gráfica D.34. Proyecciones sobre los ejes coordenados de la velocidad lineal en X.



Gráfica D.35. Proyecciones sobre los ejes coordenados de la velocidad lineal en Y.

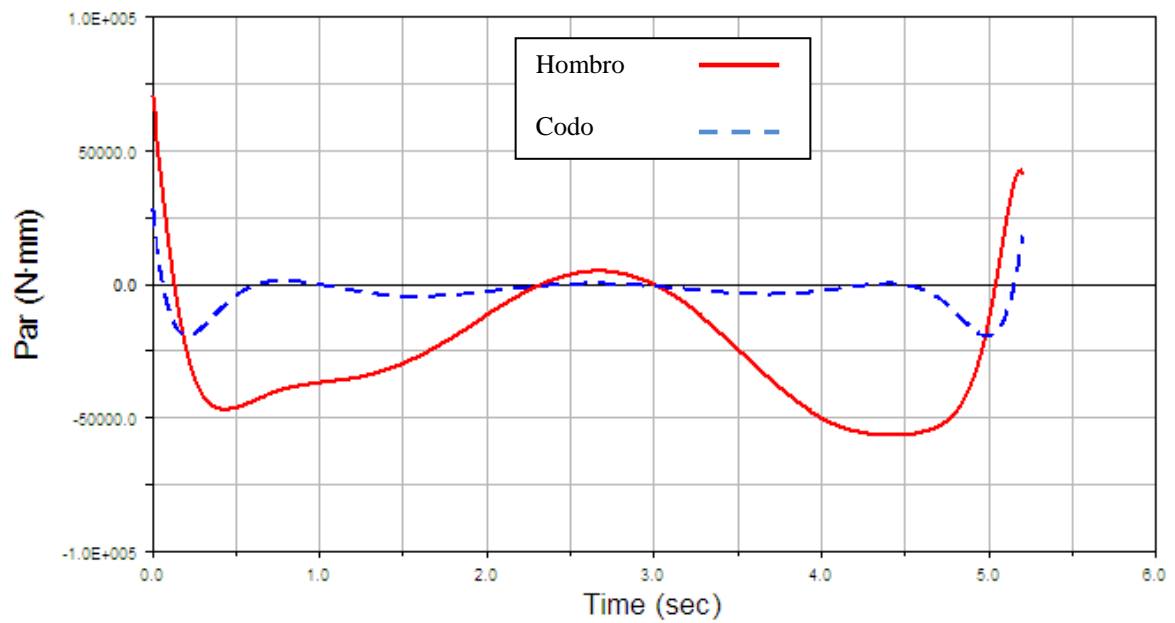


Gráfica D.36. Rotación sobre el eje Z.

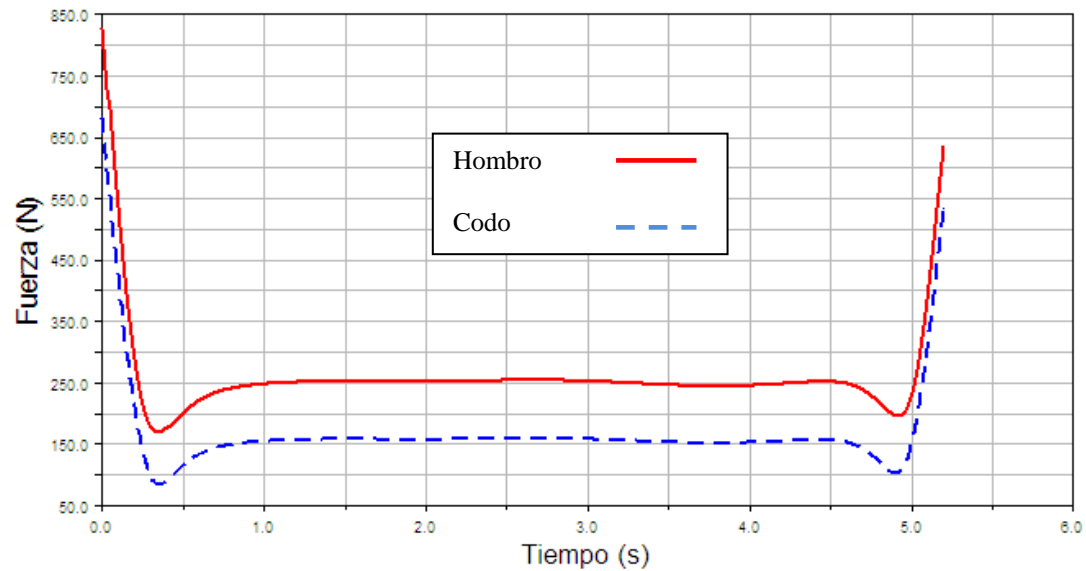


Gráfica D.37. Velocidad angular sobre el eje Z en las articulaciones.

D.E.2. Dinámica.



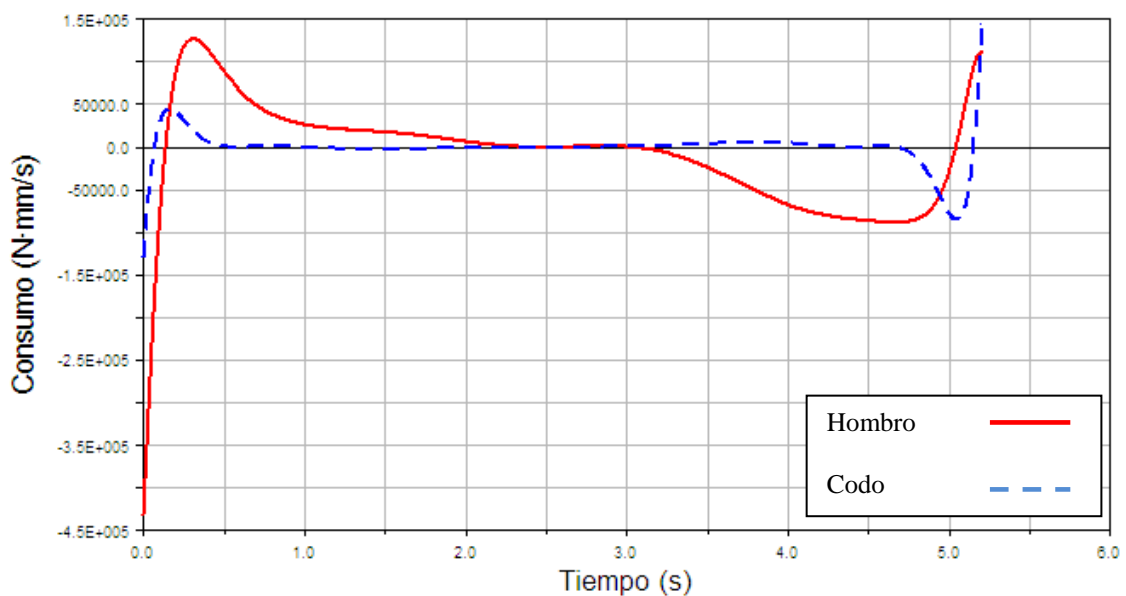
Gráfica D.38. Par motor sobre el eje Z de las articulaciones.



Gráfica D.39. Fuerza sobre las articulaciones.

Se observan picos en los extremos, resultado de las aceleraciones y deceleraciones del movimiento en los estados final e inicial.

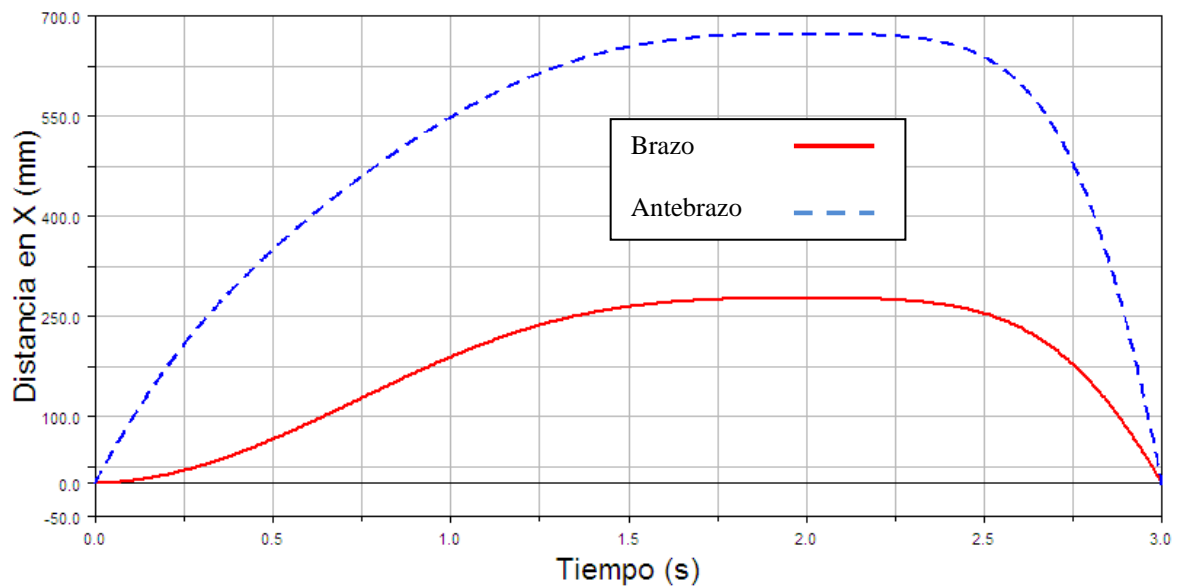
D.E.3. Consumo energético.



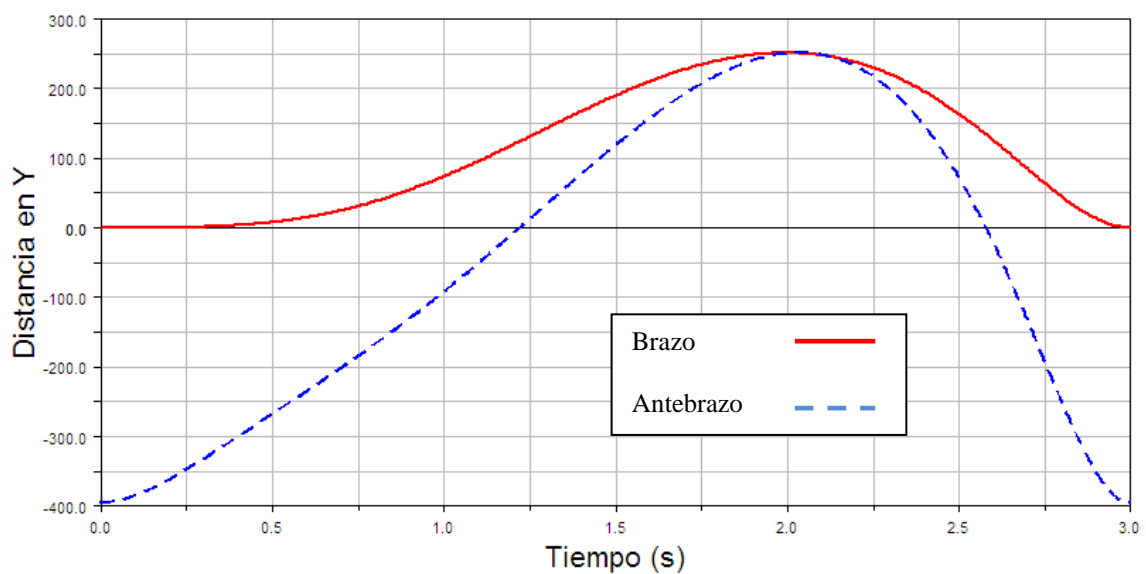
Gráfica D.40. Consumo energético de los motores.

D.F. Alargar el brazo hacia el frente con objeto de tomar algo con la mano.

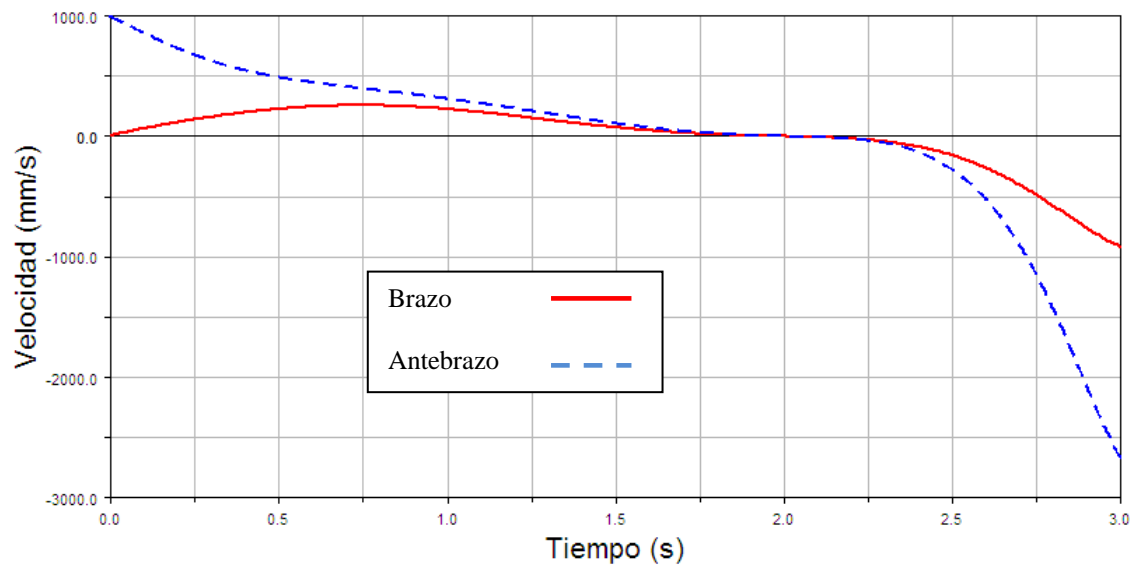
D.F.1. Cinemática



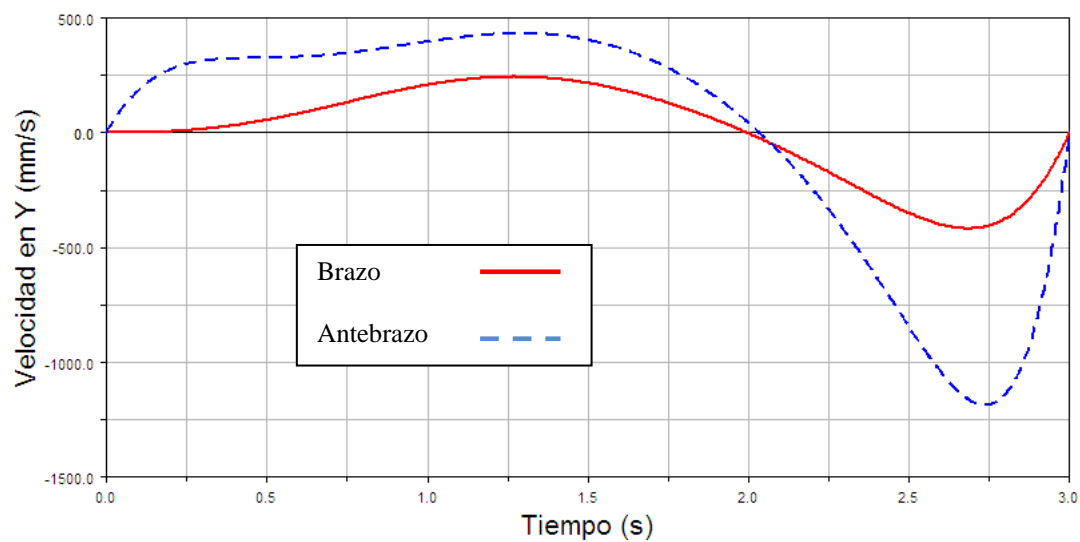
Gráfica D.41. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal en X.



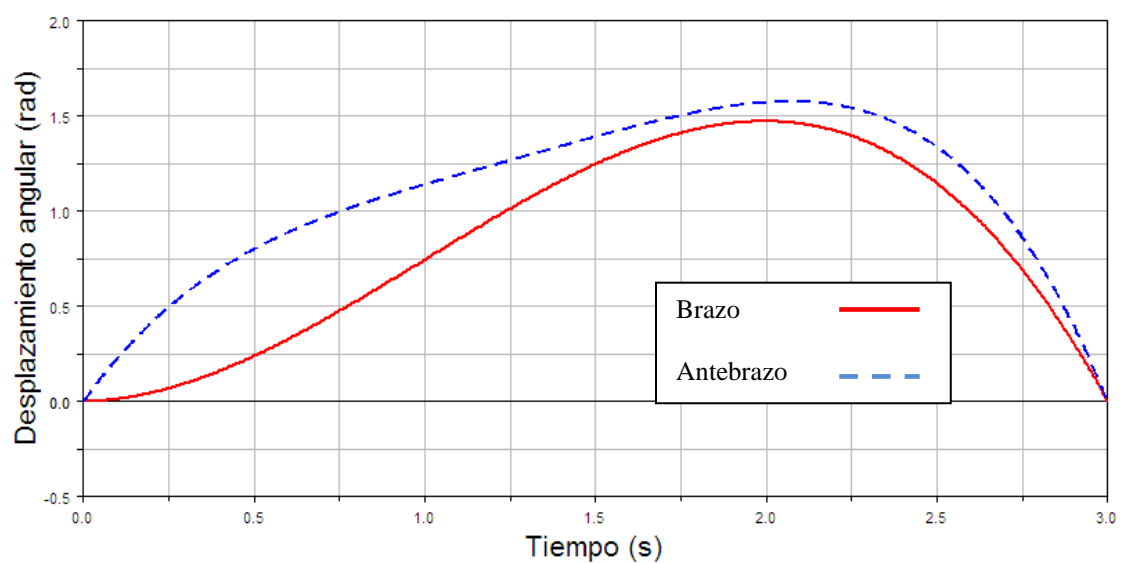
Gráfica D.42. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal en Y



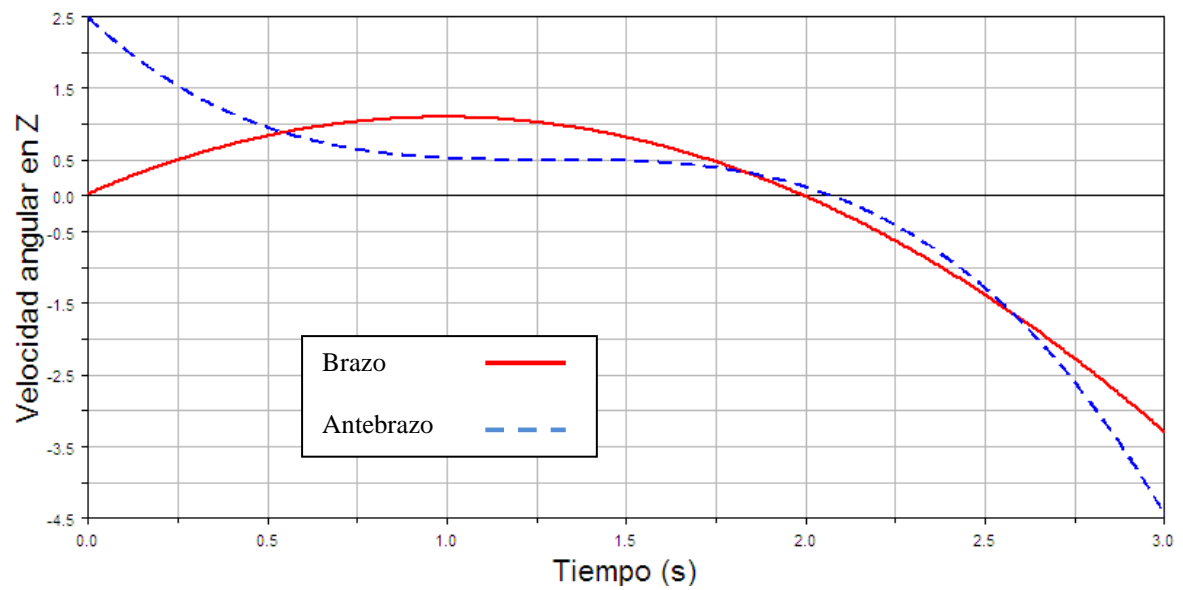
Gráfica D.43. Proyecciones sobre los ejes coordenados de la velocidad lineal en X.



Gráfica D.44. Proyecciones sobre los ejes coordenados de la velocidad lineal en Y.

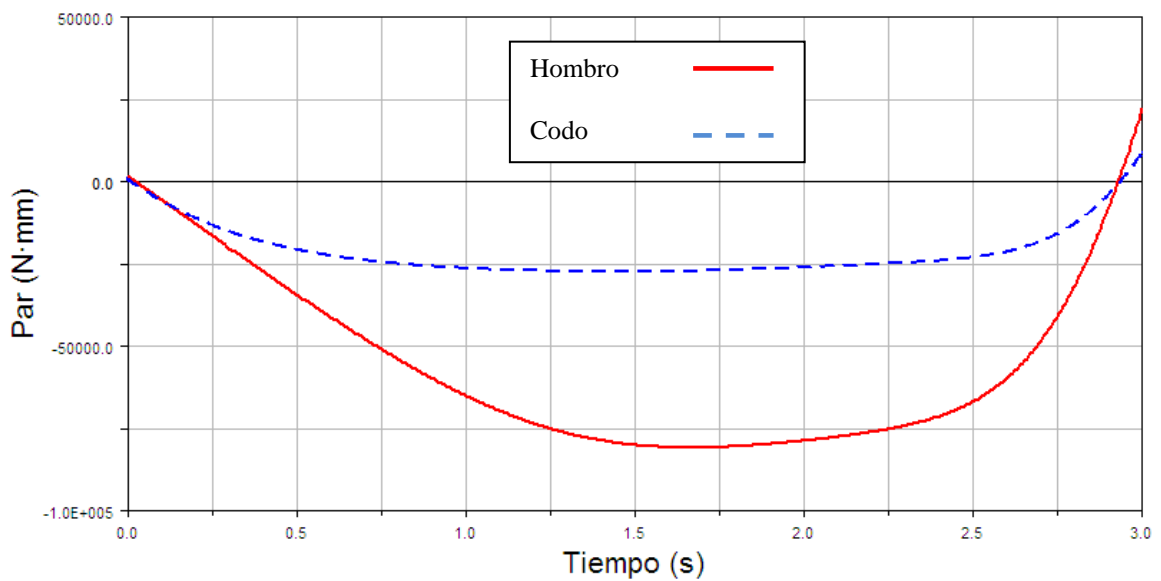


Gráfica D.45. Rotación sobre el eje Z.

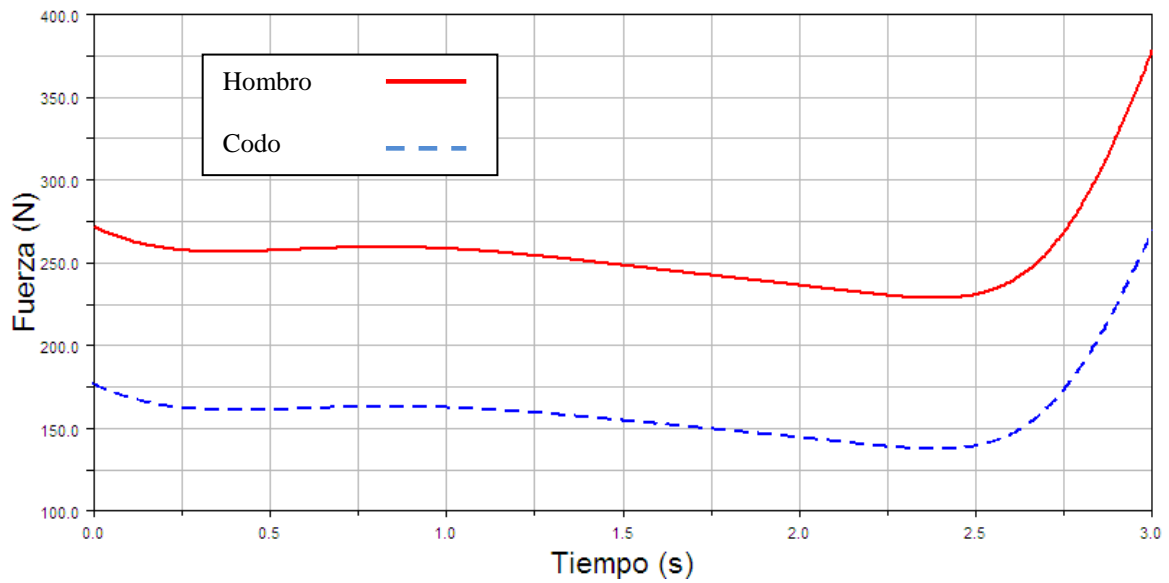


Gráfica D.46. Velocidad angular en Z.

D.F.2. Dinámica.

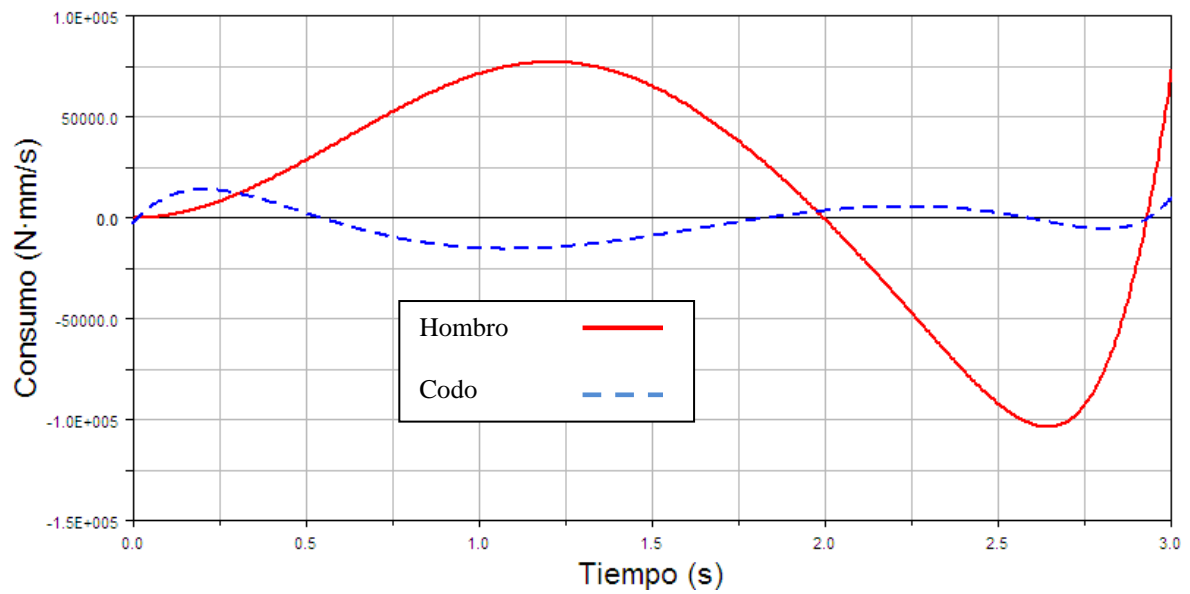


Gráfica D.47. Par motor sobre el eje Z.



Gráfica D.48. Fuerza sobre las articulaciones.

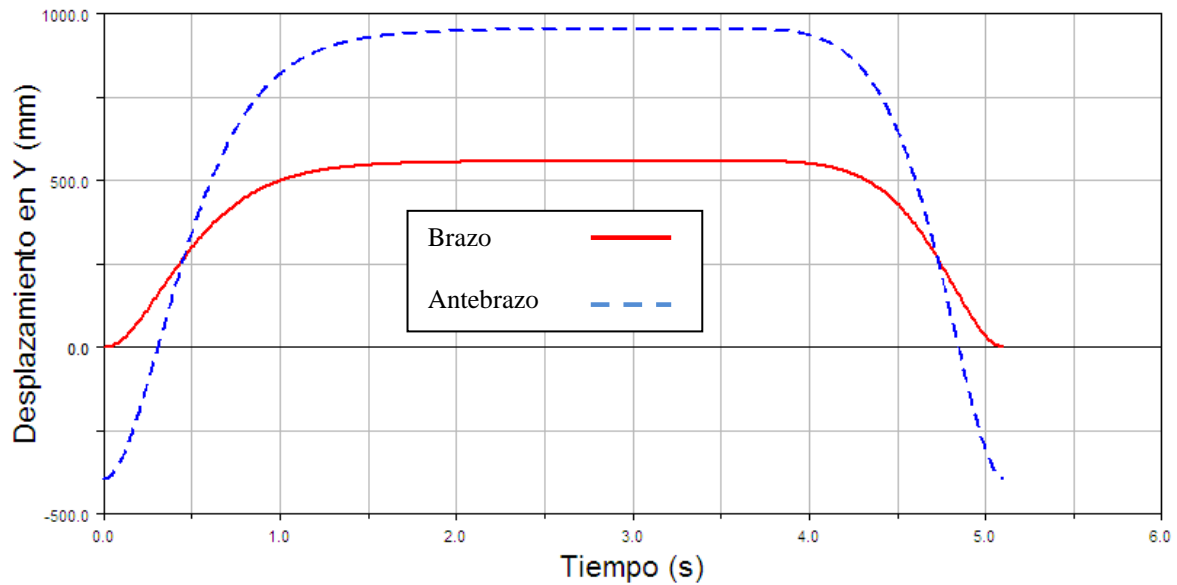
D.F.3. Consumo energético.



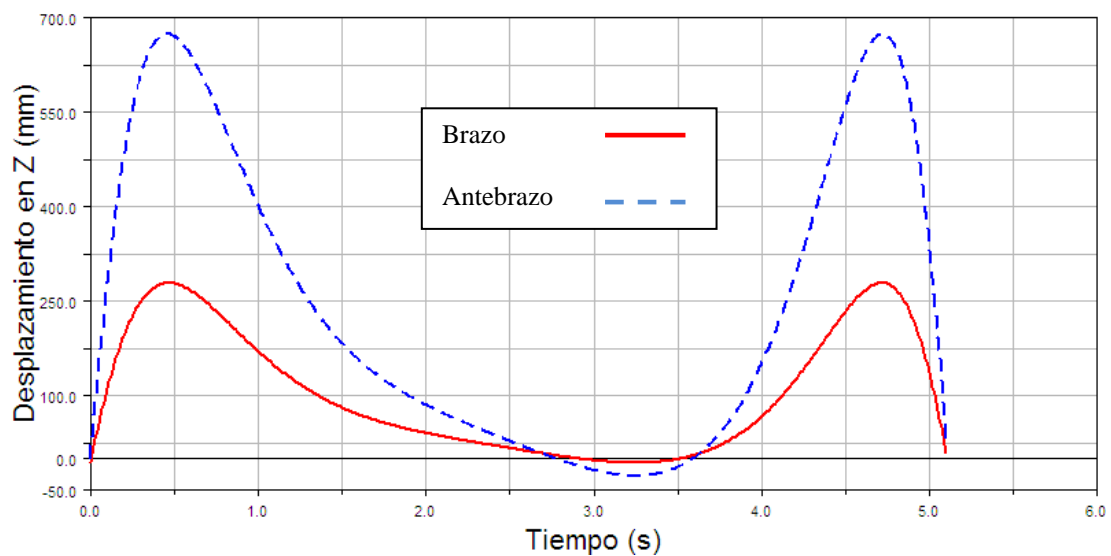
Gráfica D.49. Consumo energético de los motores.

D.G. Elevación lateral simple del brazo. Abducción.

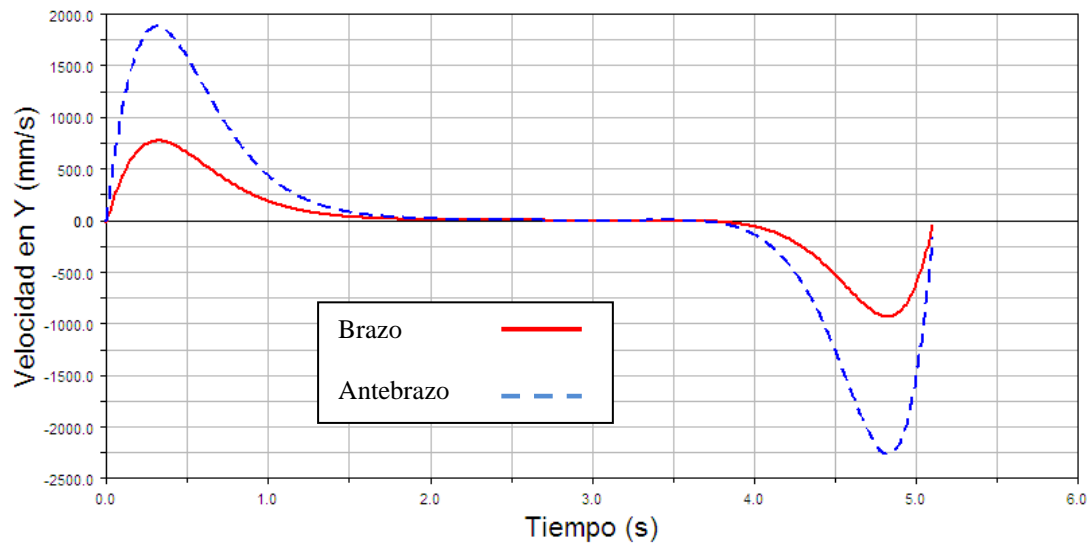
D.G.1. Cinemática



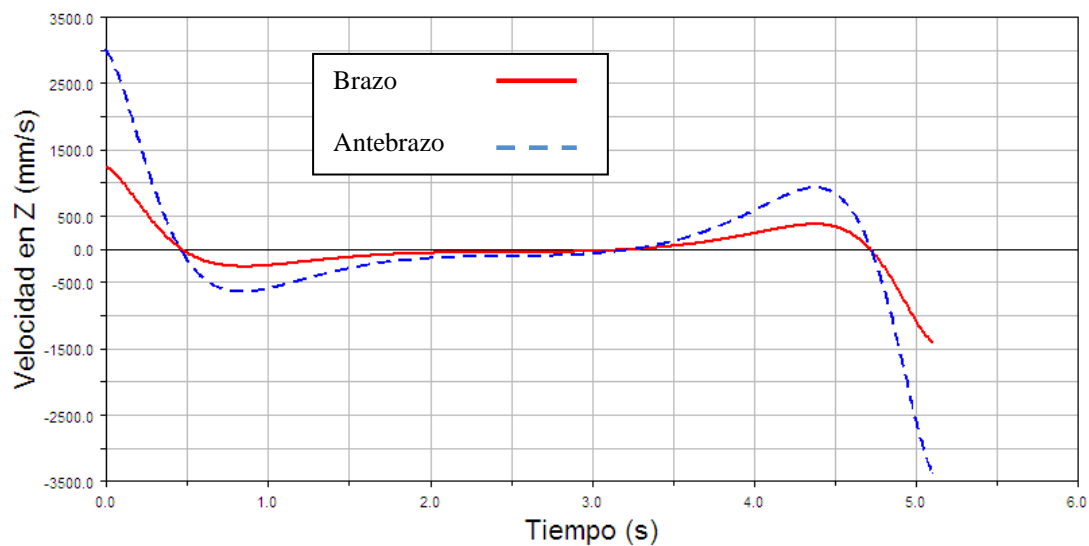
Gráfica D.50. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal en Y.



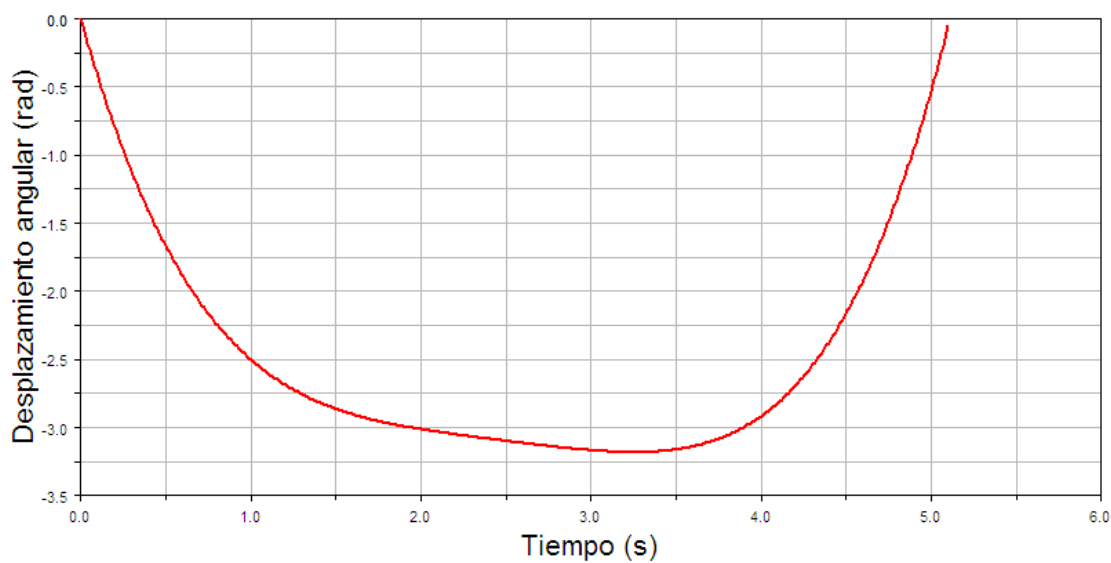
Gráfica D.51. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal en Z.



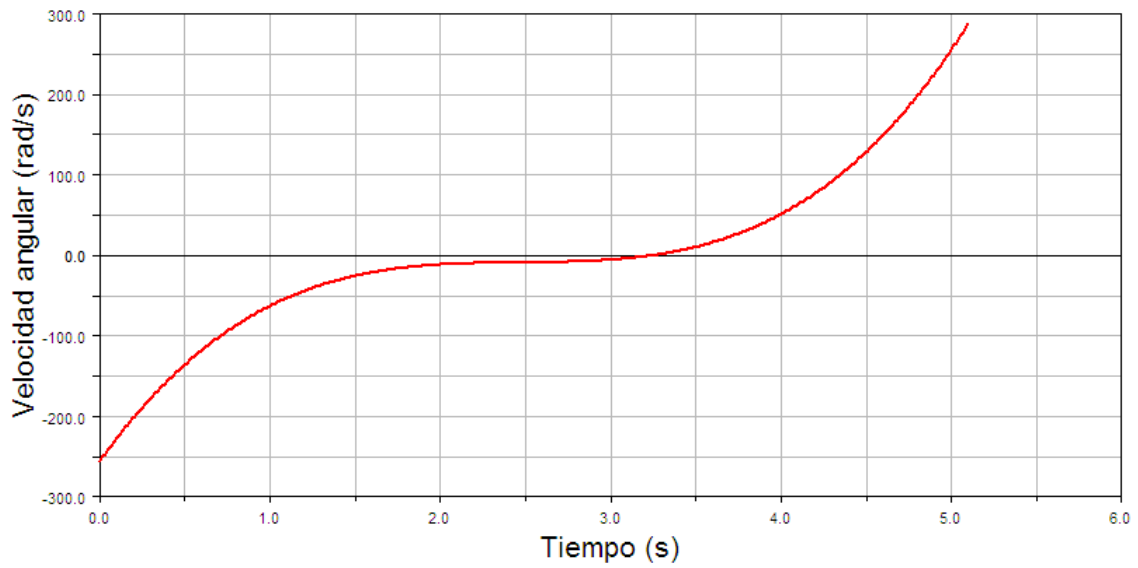
Gráfica D.52. Proyecciones sobre los ejes coordenados de la velocidad lineal en Y.



Gráfica D.53. Proyecciones sobre los ejes coordenados de la velocidad lineal en Z.

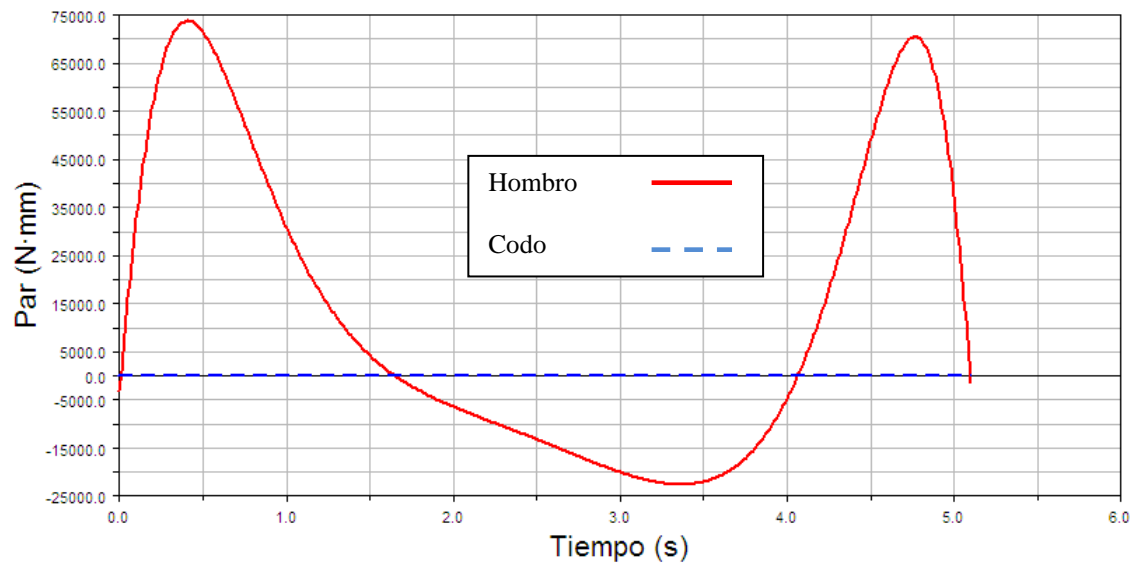


Gráfica D.54. Rotación sobre el eje X, antebrazo y brazo solidarios.

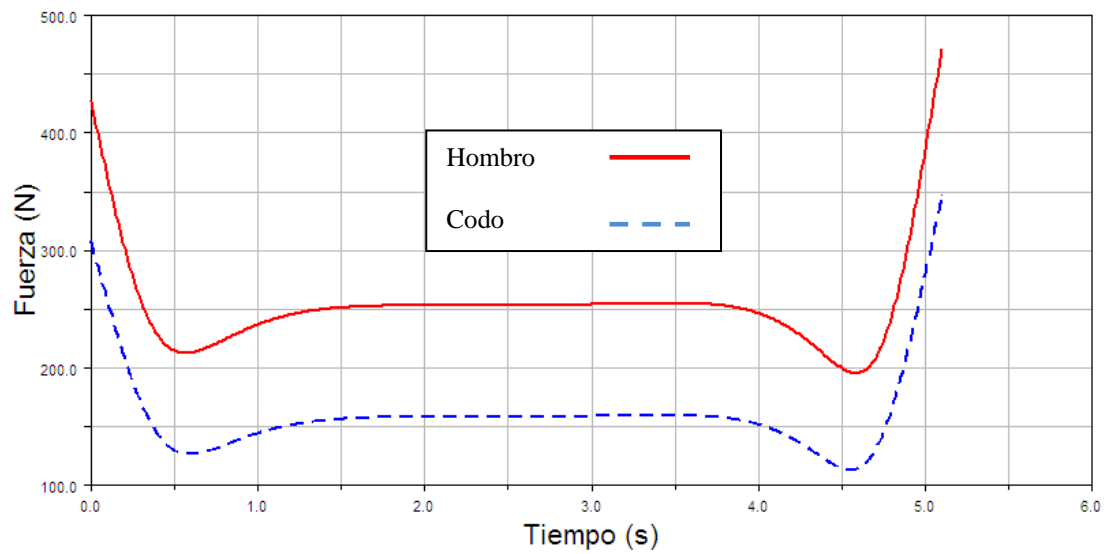


Gráfica D.55. Velocidad angular en X, antebrazo y brazo solidarios.

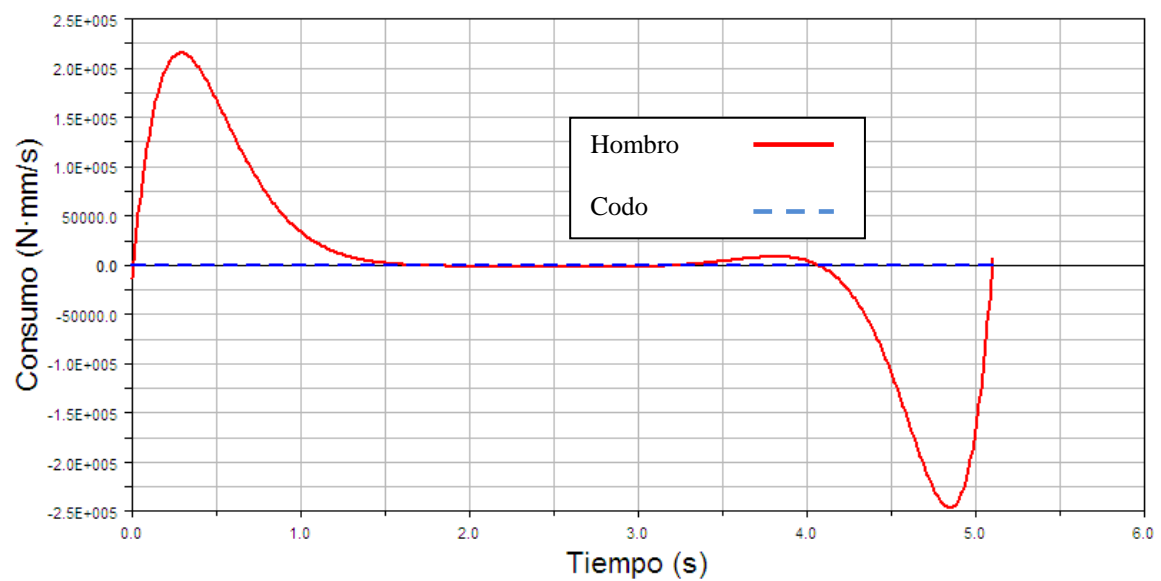
D.G.2. Dinámica.



Gráfica D.56. Par motor sobre el eje X.



Gráfica D.57. Fuerza sobre las articulaciones.

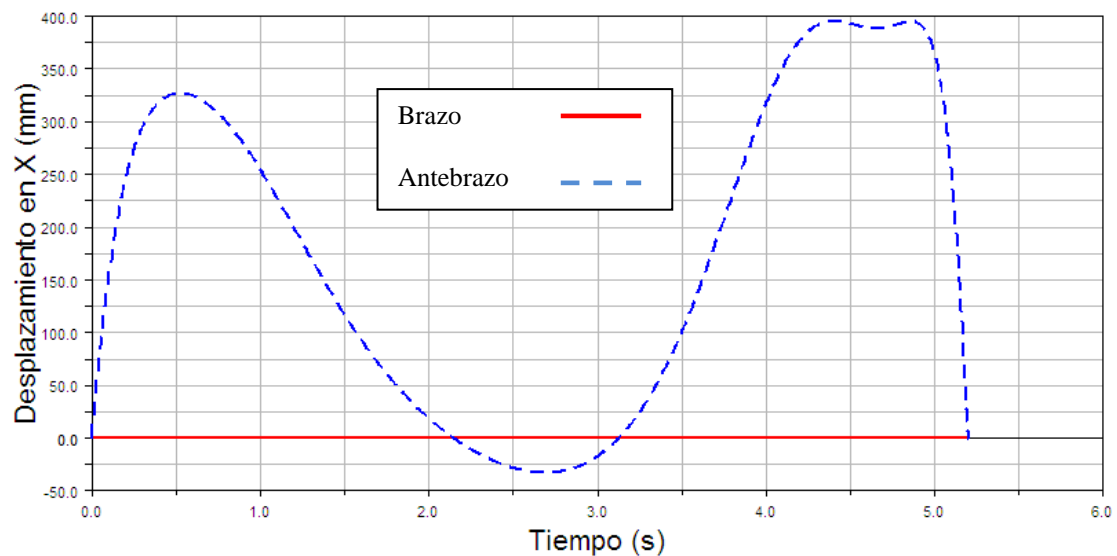
D.G.3. Consumo energético.

Gráfica D.58. Consumo energético de los motores.

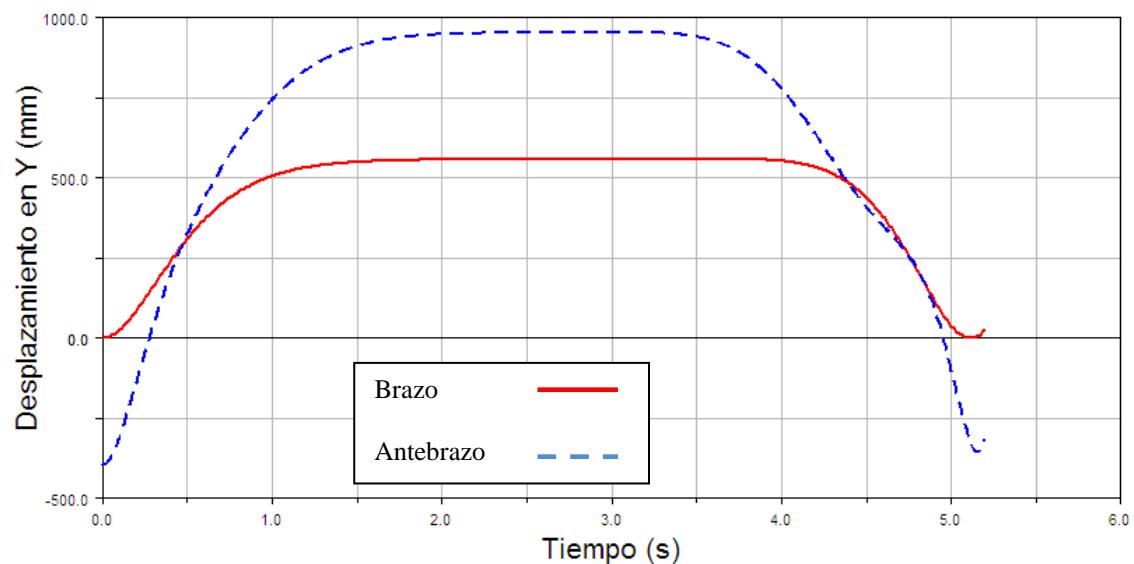
D.H. Elevación lateral compleja del brazo. Abducción del hombro más flexoextensión del codo.

Este es el movimiento más complejo, ya que combina varios movimientos en uno solo. Además de la abducción del hombro existe una flexoextensión del codo.

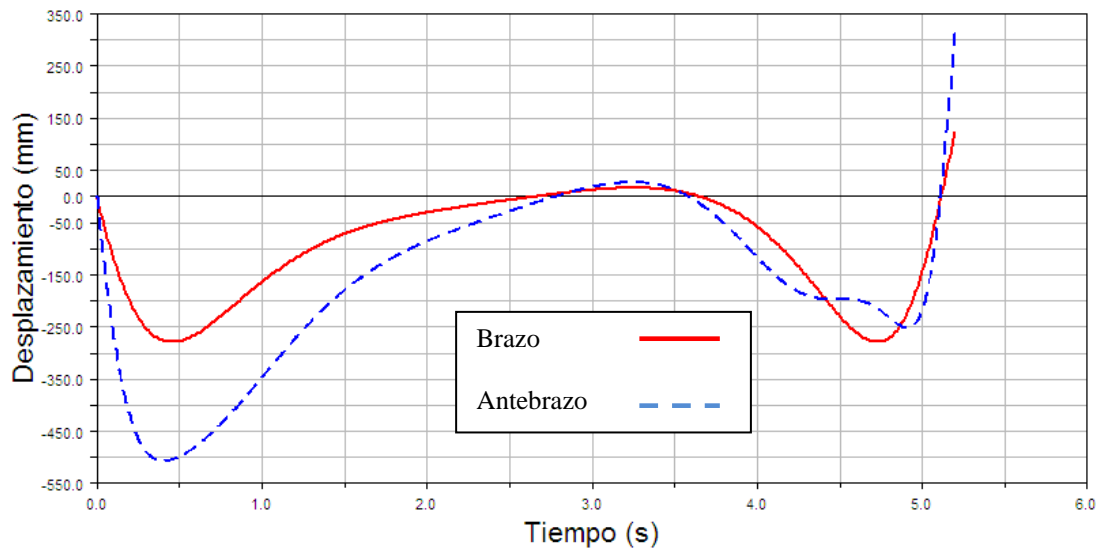
D.H. 1. Cinemática.



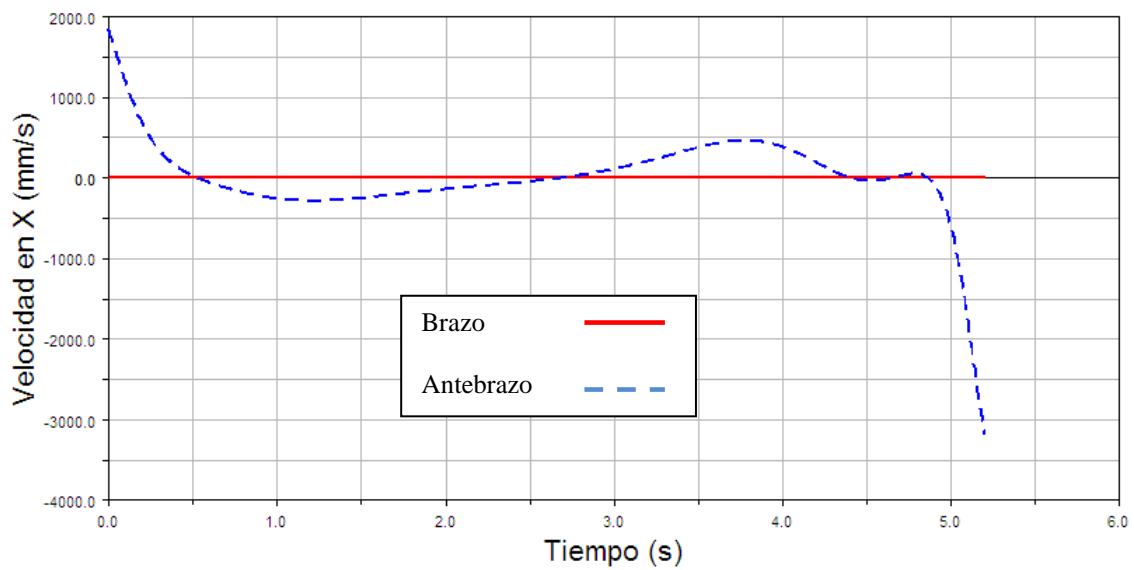
Gráfica D.59. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal en X.



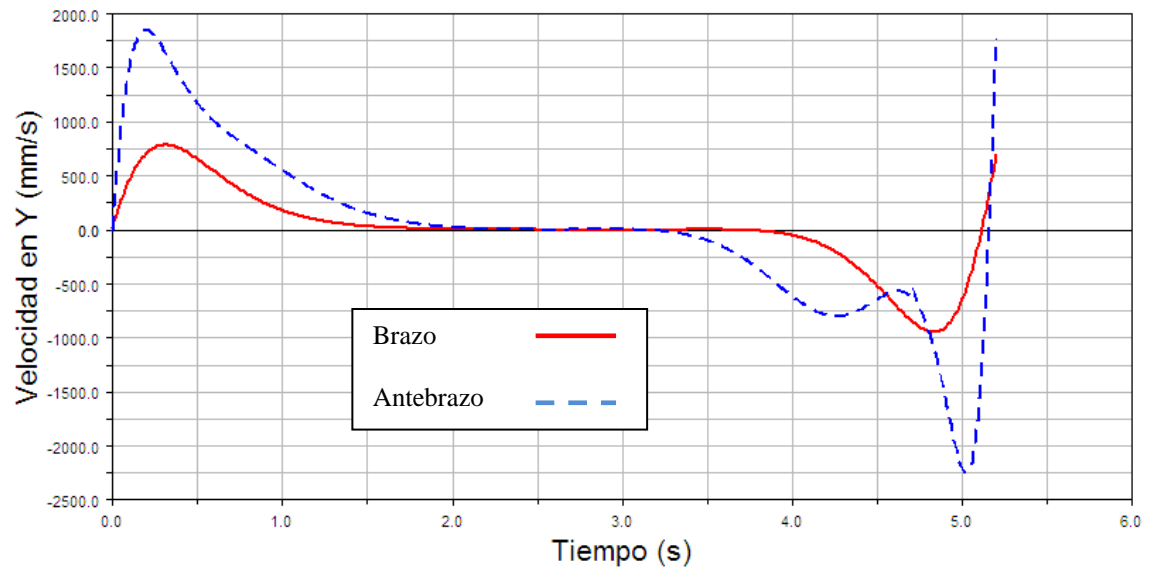
Gráfica D.60. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal en Y.



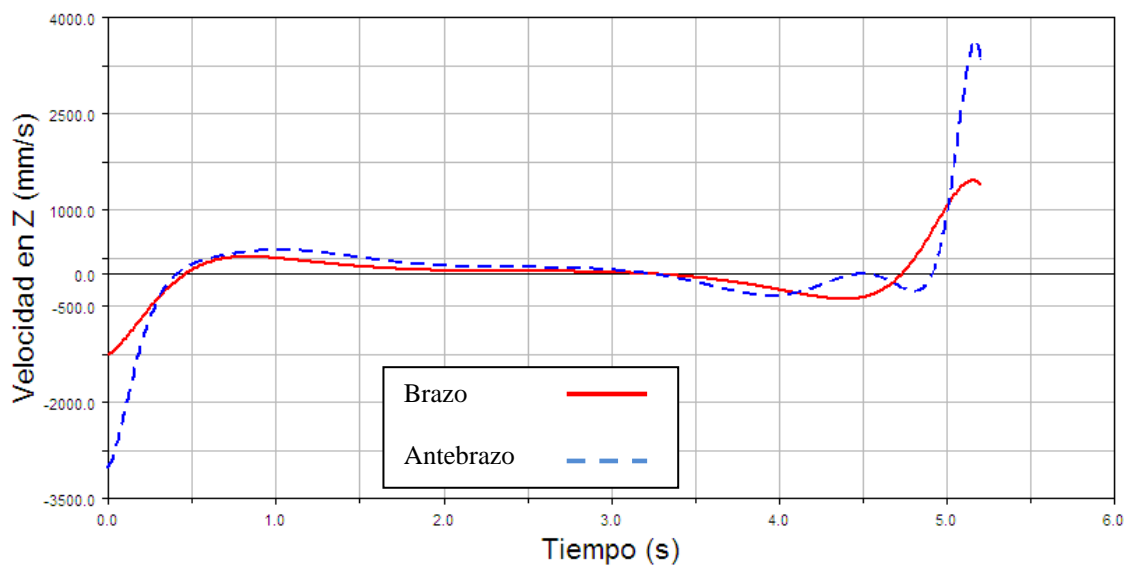
Gráfica D.61. Proyecciones sobre los ejes coordenados del desplazamiento lineal en Z.



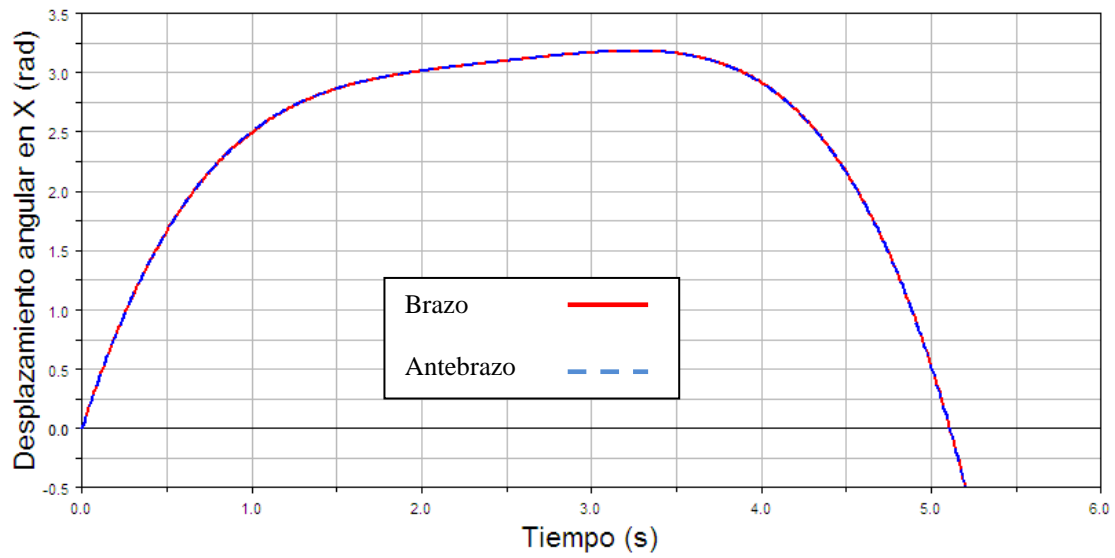
Gráfica D.62. Proyecciones sobre los ejes coordenados de la velocidad en X.



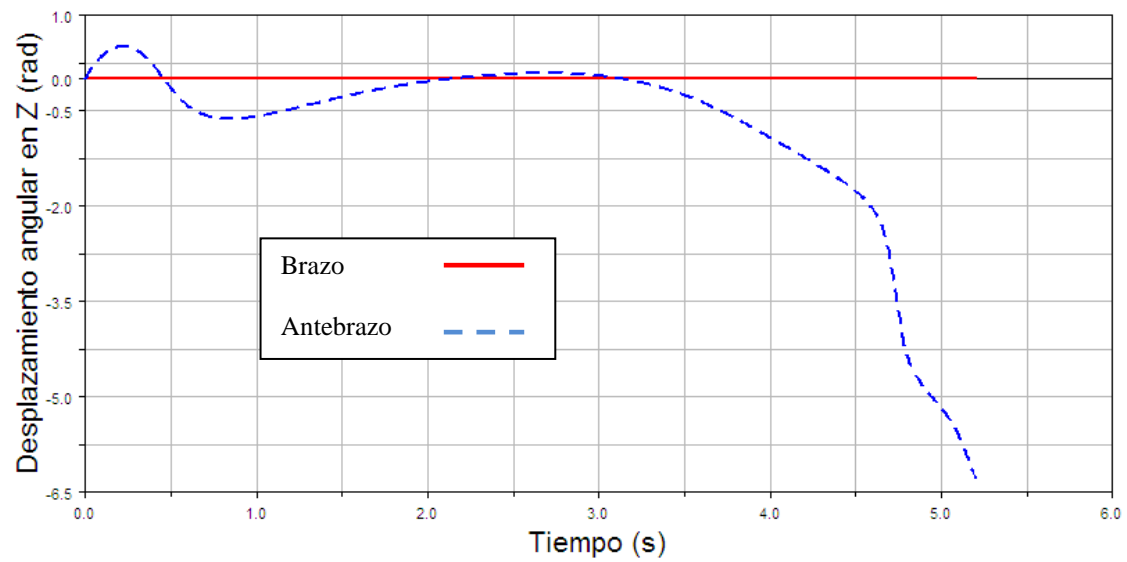
Gráfica D.63. Proyecciones sobre los ejes coordenados de la velocidad en Y.



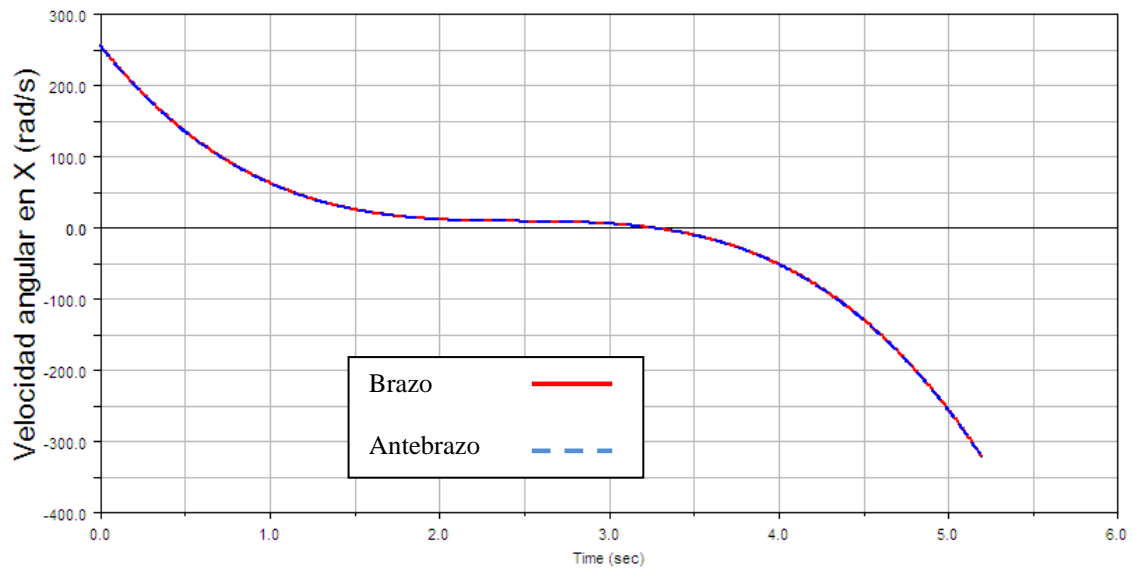
Gráfica D.64. Proyecciones sobre los ejes coordenados de la velocidad en Z.



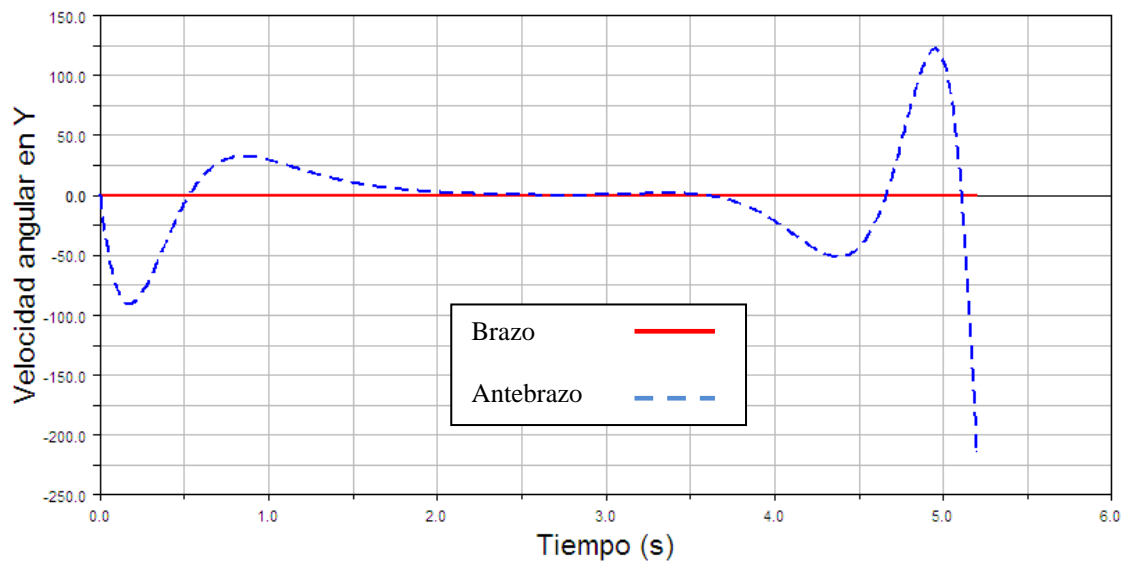
Gráfica D.65. Desplazamiento angular en X.



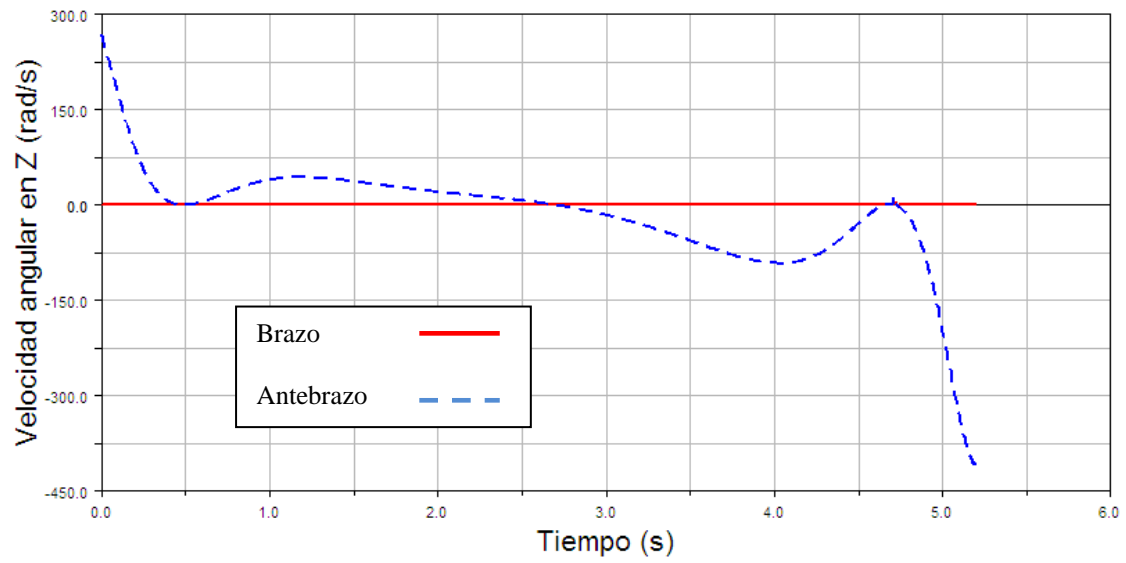
Gráfica D.66. Desplazamiento angular en Z.



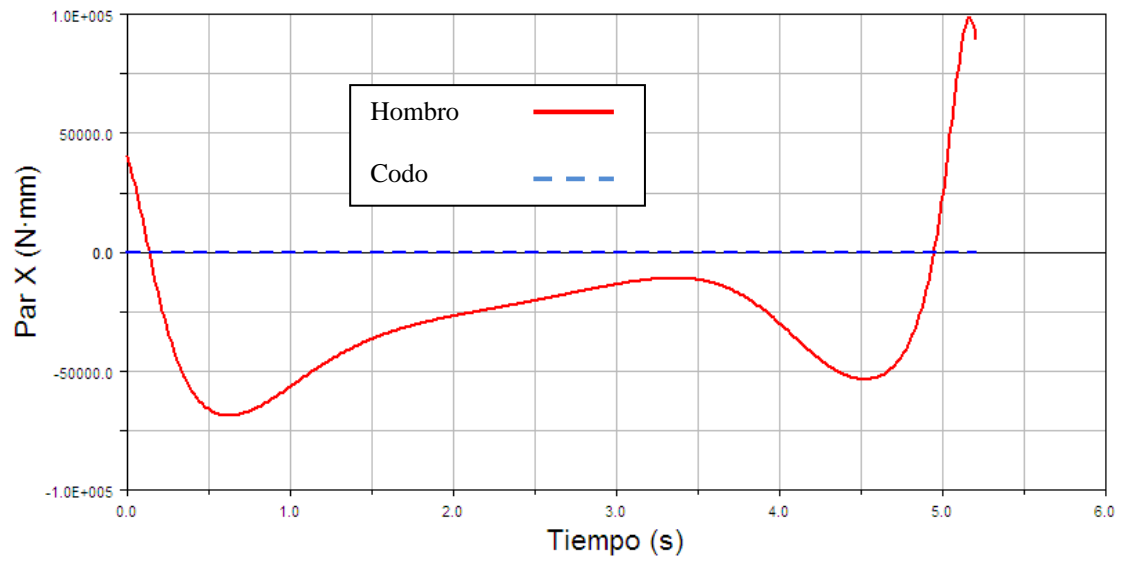
Gráfica D.67. Velocidad angular en X.



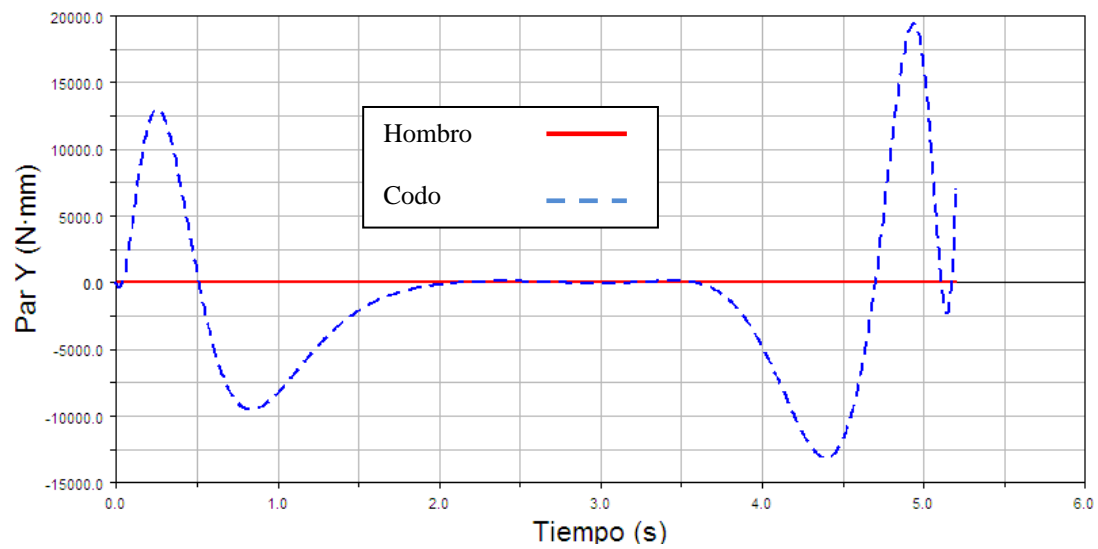
Gráfica D.68. Velocidad angular en Y.



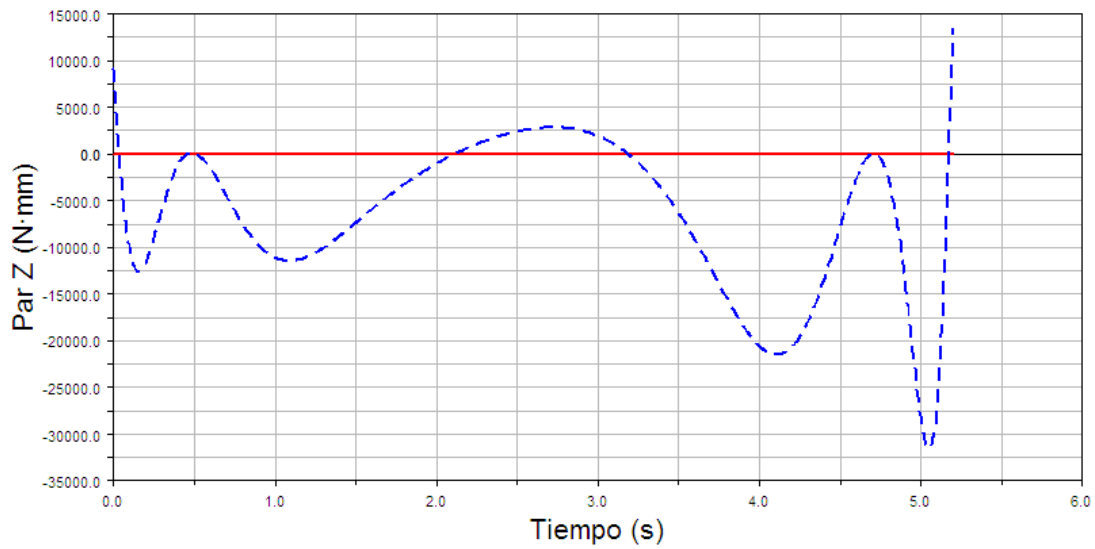
Gráfica D.69. Velocidad angular en Z.



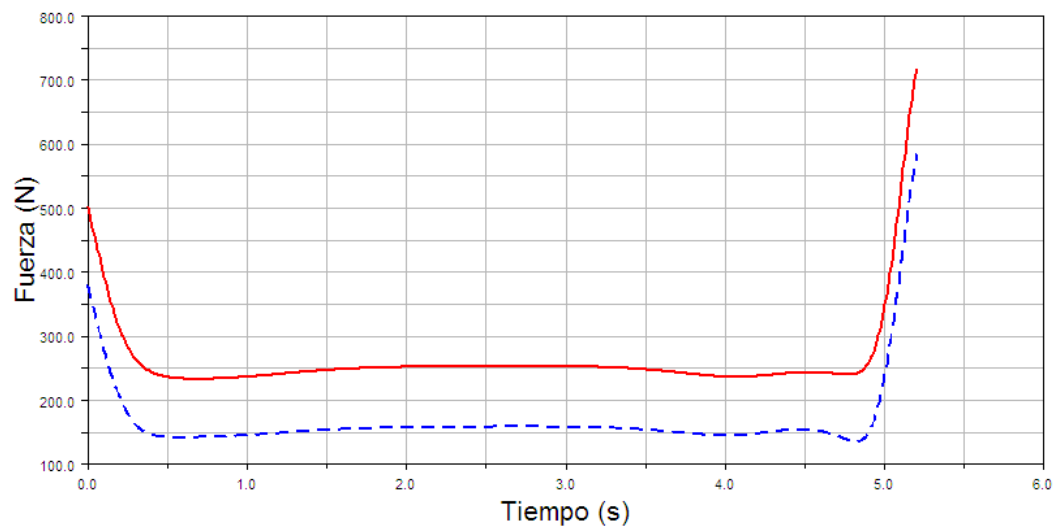
Gráfica D.70. Par en el eje X.



Gráfica D.71. Par en el eje Y.

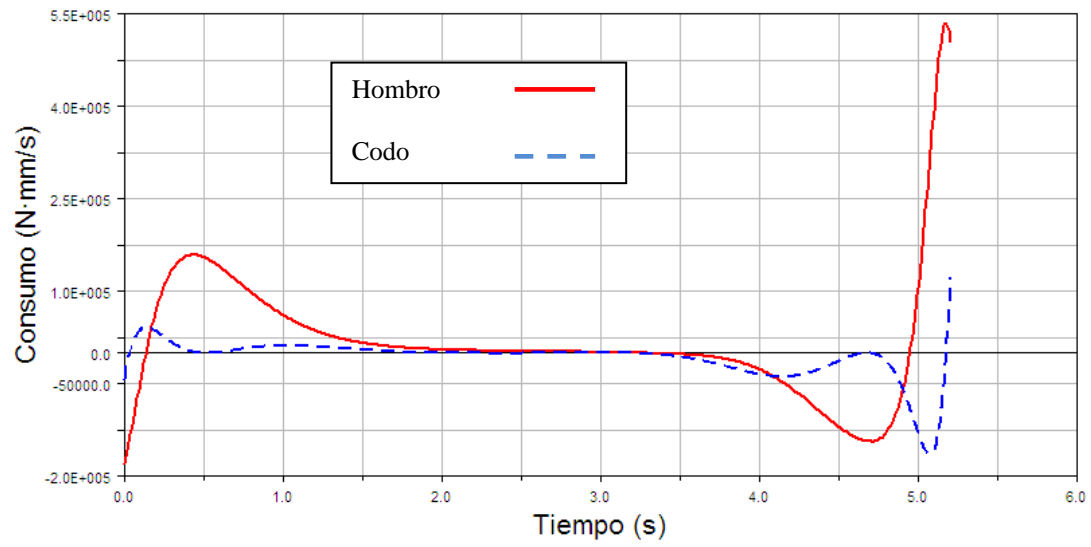


Gráfica D.72. Par en el eje Z.



Gráfica D.73. Fuerza sobre las articulaciones.

D.H.3. Consumo energético.



Gráfica D.74. Consumo energético de los motores.

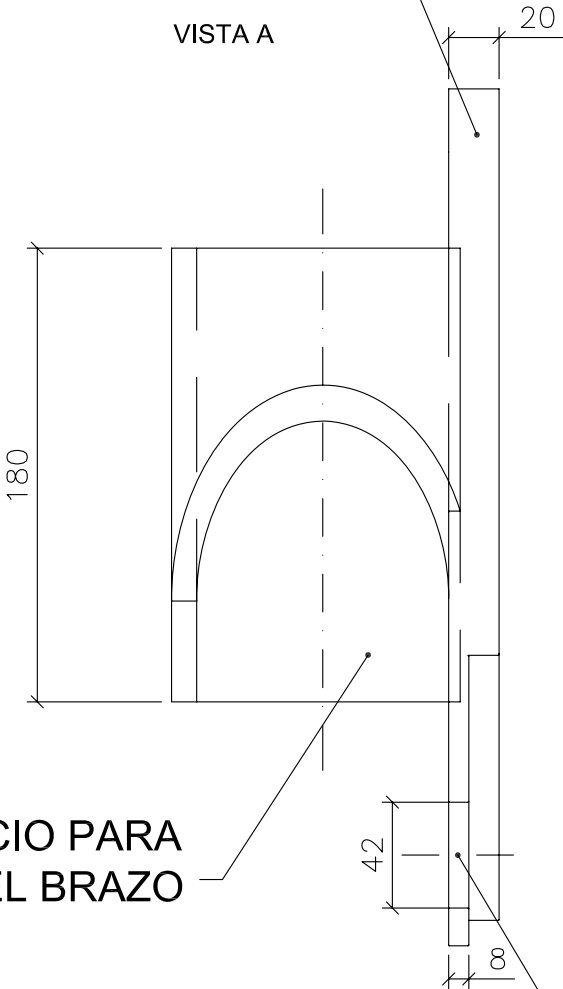
ANEXO E. DOCUMENTACIÓN GRÁFICA

En la documentación gráfica adjunta se ha representado por un lado una representación constructiva del modelo a calcular, y por otro los diagramas unifilares necesarios para el control PID de las simulaciones, siendo el listado de planos:

- P1. Pieza 1. Exobrazo
- P2. Pieza 2. Exoantebrazo
- P3. Pieza 3. Anillo interior del rodamiento
- P4. Pieza 4. Anillo exterior del rodamiento
- P5. Ensamblado 1. Rodamiento 16004D
- P6. Ensamblado 2. Exoesqueleto montado
- P7. Ensamblado 2. Exoesqueleto montado. Rangos
- P8. Ensamblado 2. Exoesqueleto montado. Materiales
- P9. Diagrama Matlab A
- P10. Diagrama Matlab B
- P11. Diagrama Matlab C
- P12. Diagrama Matlab D
- P13. Diagrama Matlab E
- P14. Diagrama Matlab F
- P15. Diagrama Matlab G
- P16. Diagrama Matlab H

SEGMENTO
PARALELO AL BRAZO

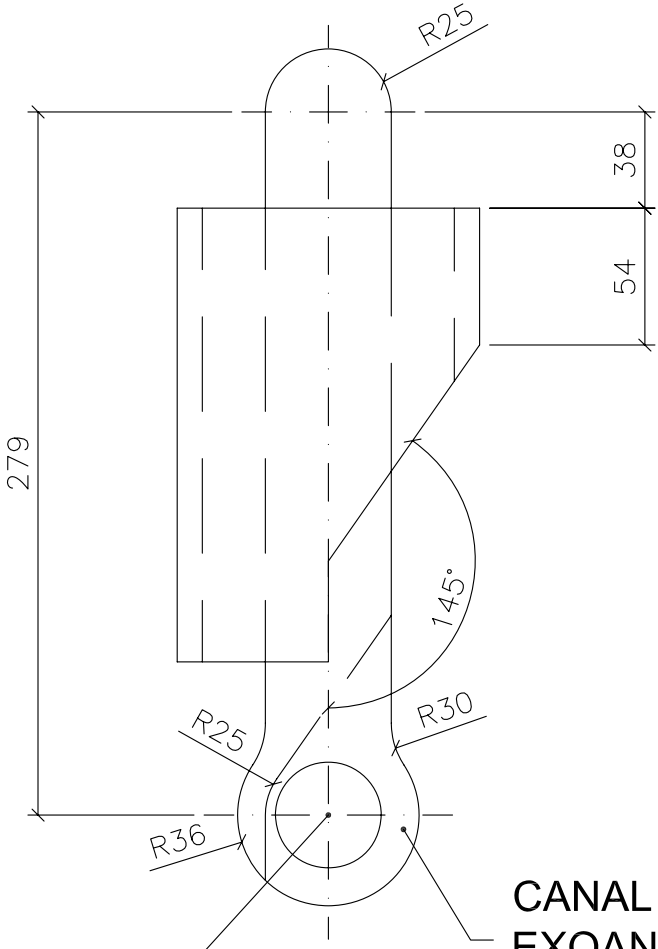
VISTA A



ESPACIO PARA
EL BRAZO

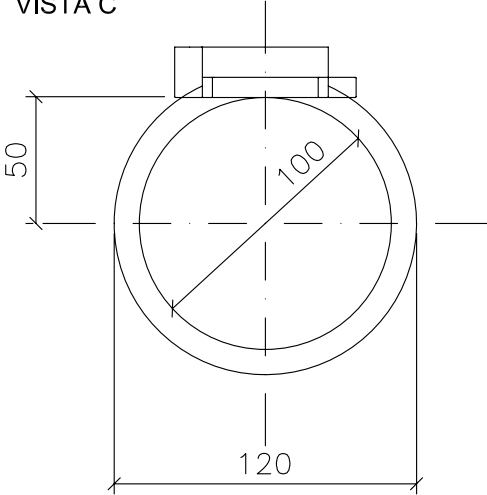
ALEJAMIENTO
DEL RODAMIENTO

VISTA B

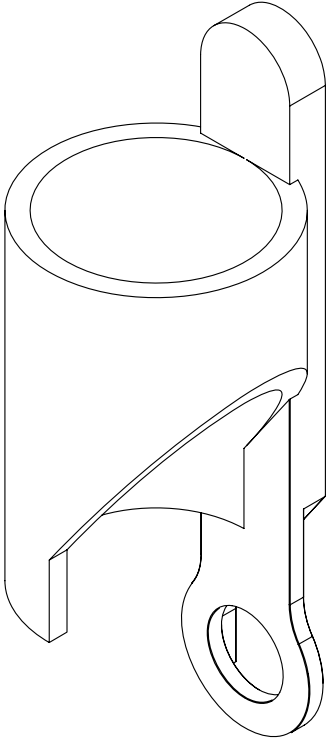


CANAL PARA EL
EXOANTEBRAZO

VISTA C



C



B

A

VISTAS PIEZA 1, EXOBRAZO
ESCALA 1:3

FECHA

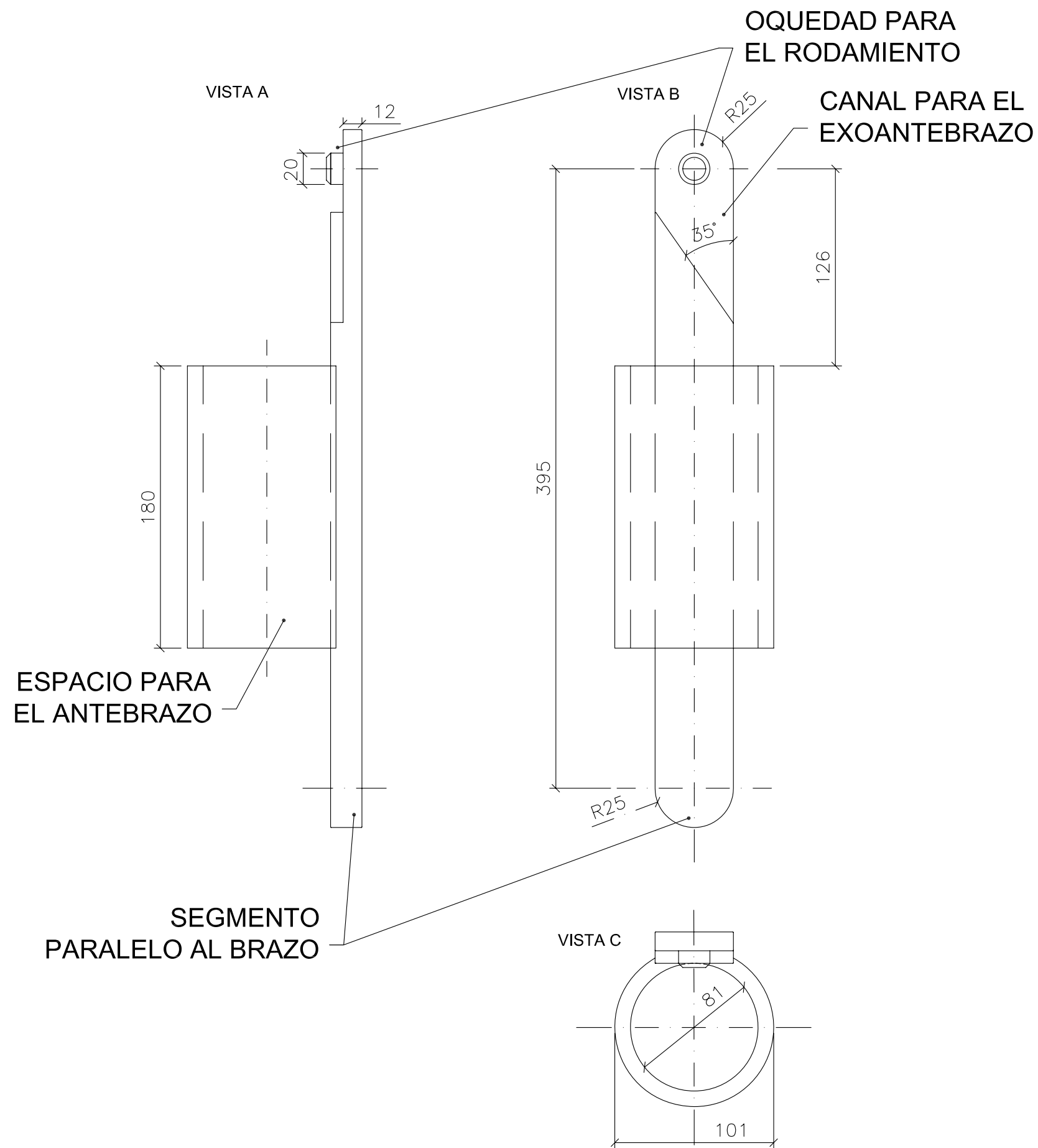


PLANO
PIEZA 1. EXOBRAZO

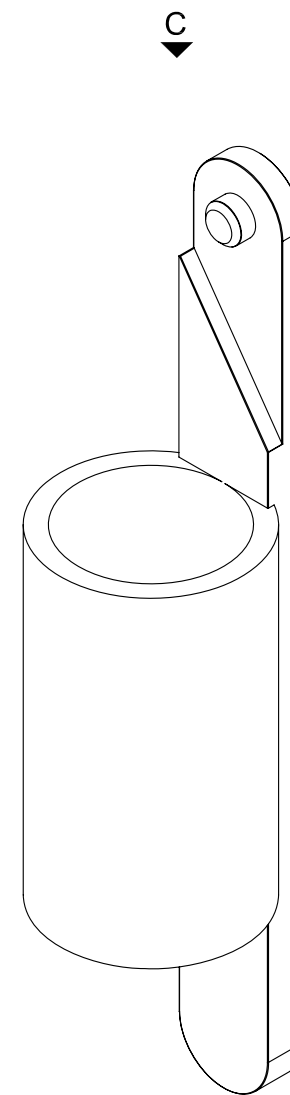
HYPER NEUROPROSTHETIC AND NEUROROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
SITUACION	MUNICIPIO	LEGANÉS	
	PROVINCIA	MADRID	

Plano Nº	MARCOS MARTINEZ REDONDO	Versión	ESCALA
01		1	1/3
		Fecha	
		13-08-2011	





VISTAS PIEZA 2. EXOANTEBRAZO
ESCALA1:3

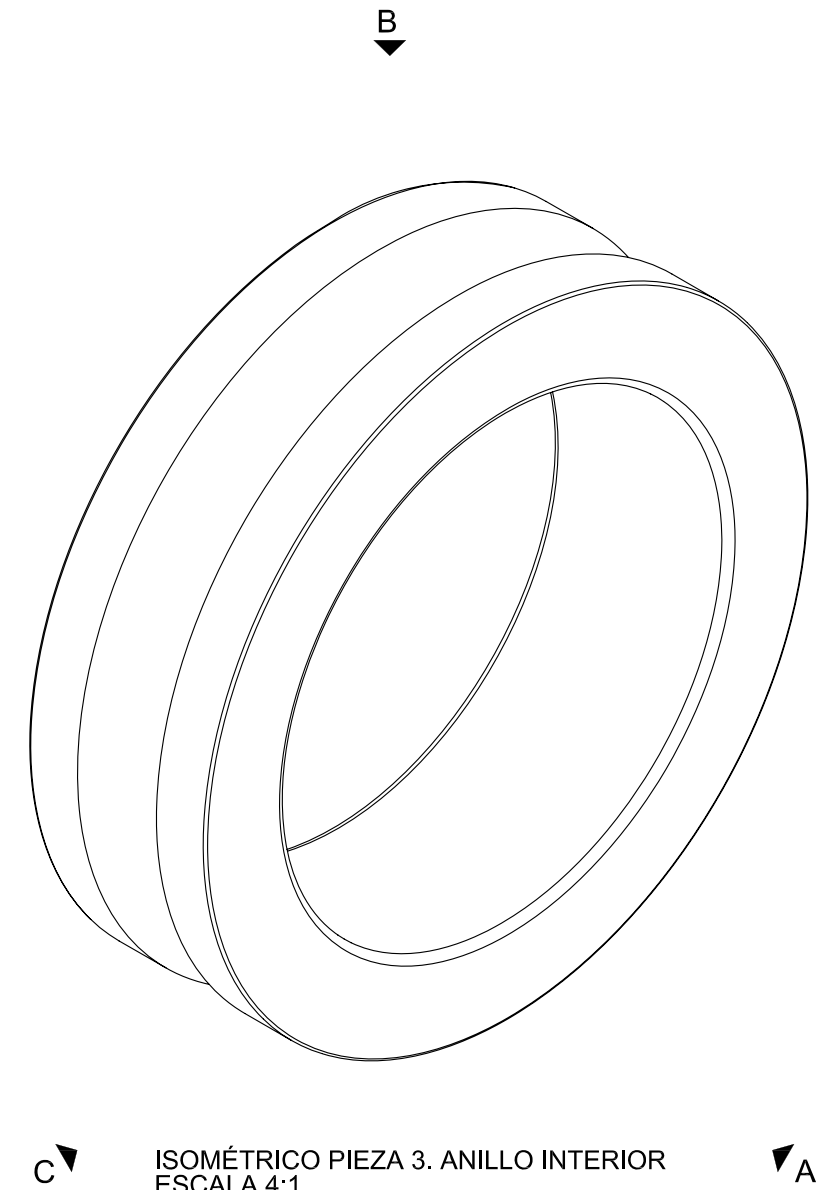
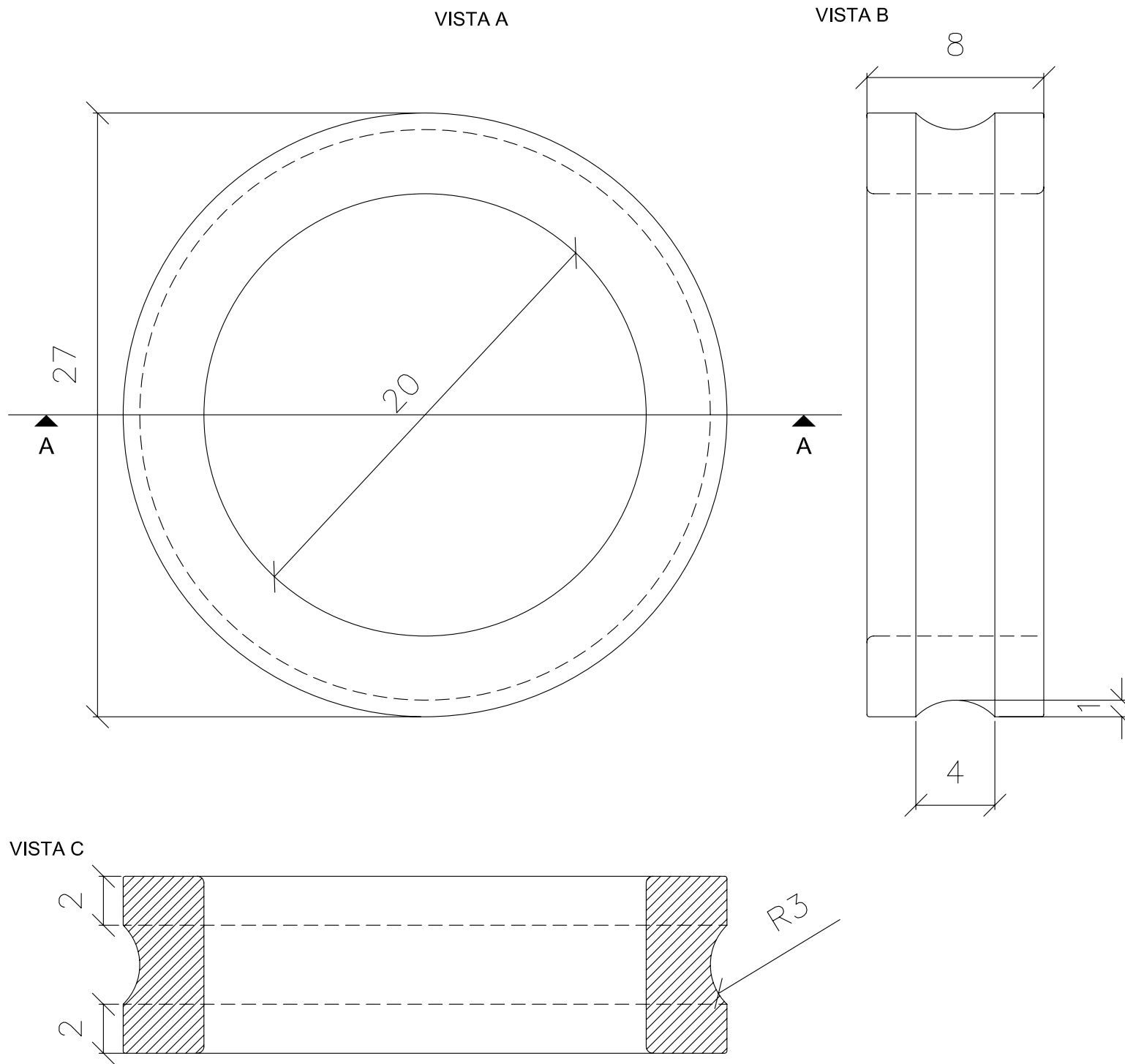


B

ISOMÉTRICO PIEZA 2. EXOANTEBRAZO
ESCALA1:3

A

FECHA		PLANO	
		PIEZA 2. EXOANTEBRAZO	
		HYPER NEUROPROSTHETIC AND NEUROROBOTIC DEVICES FOR FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION OF MOTOR DISORDERS	
PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
MUNICIPIO	LEGANÉS		
PROVINCIA	MADRID		
Plano Nº	MARCOS MARTINEZ REDONDO	Versión	ESCALA
02		1	1/3
		Fecha	
		13-08-2011	



VISTAS PIEZA 3. ANILLO INTERIOR
ESCALA 4:1

FECHA

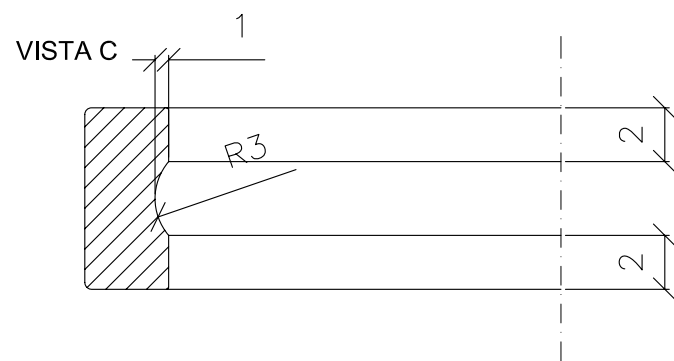
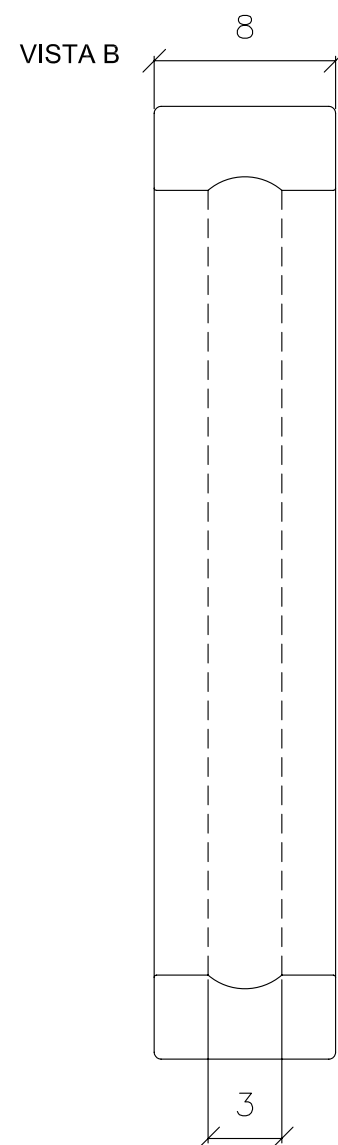
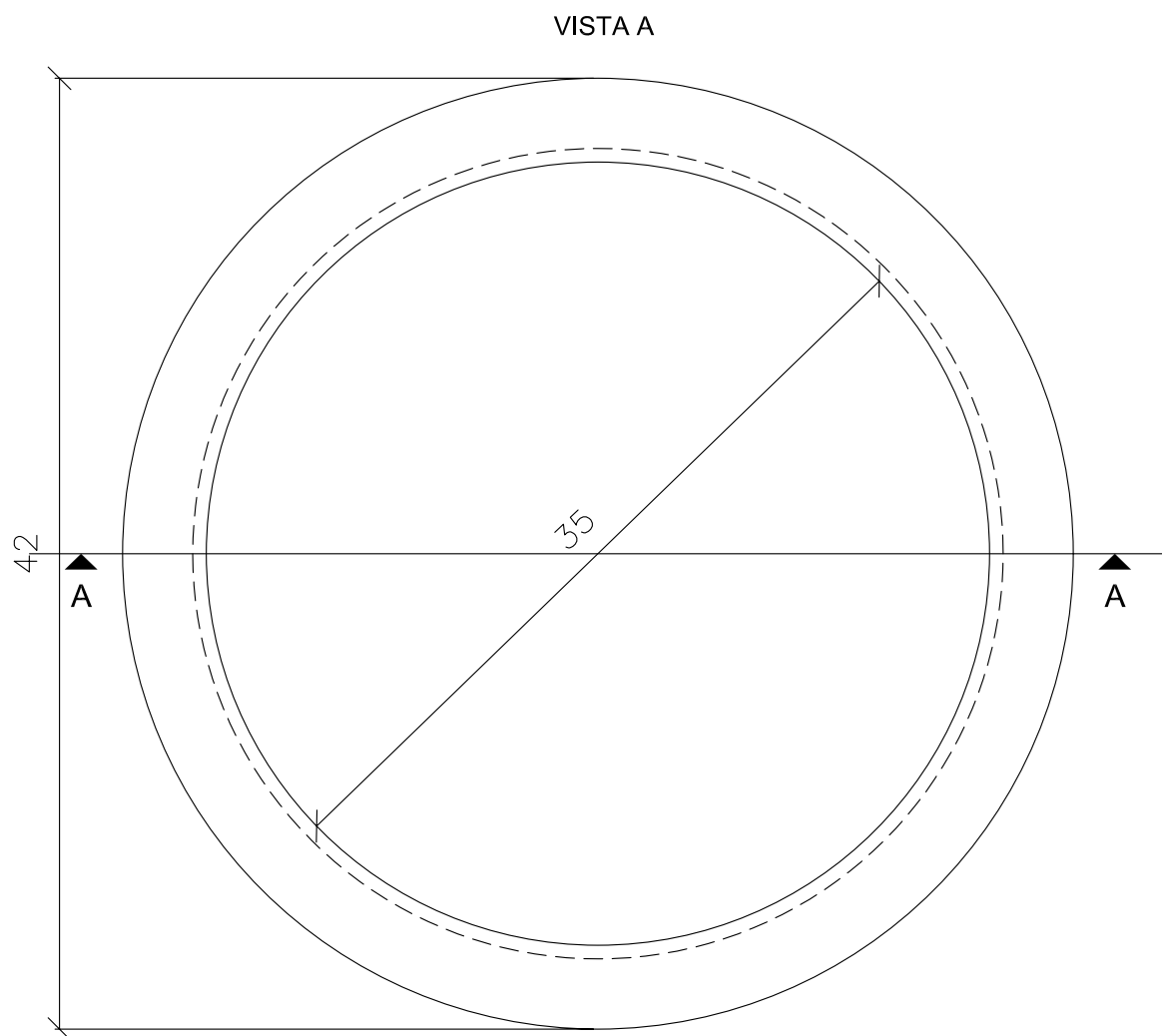


PLANO
PIEZA 3. ANILLO INTERIOR
DEL RODAMIENTO

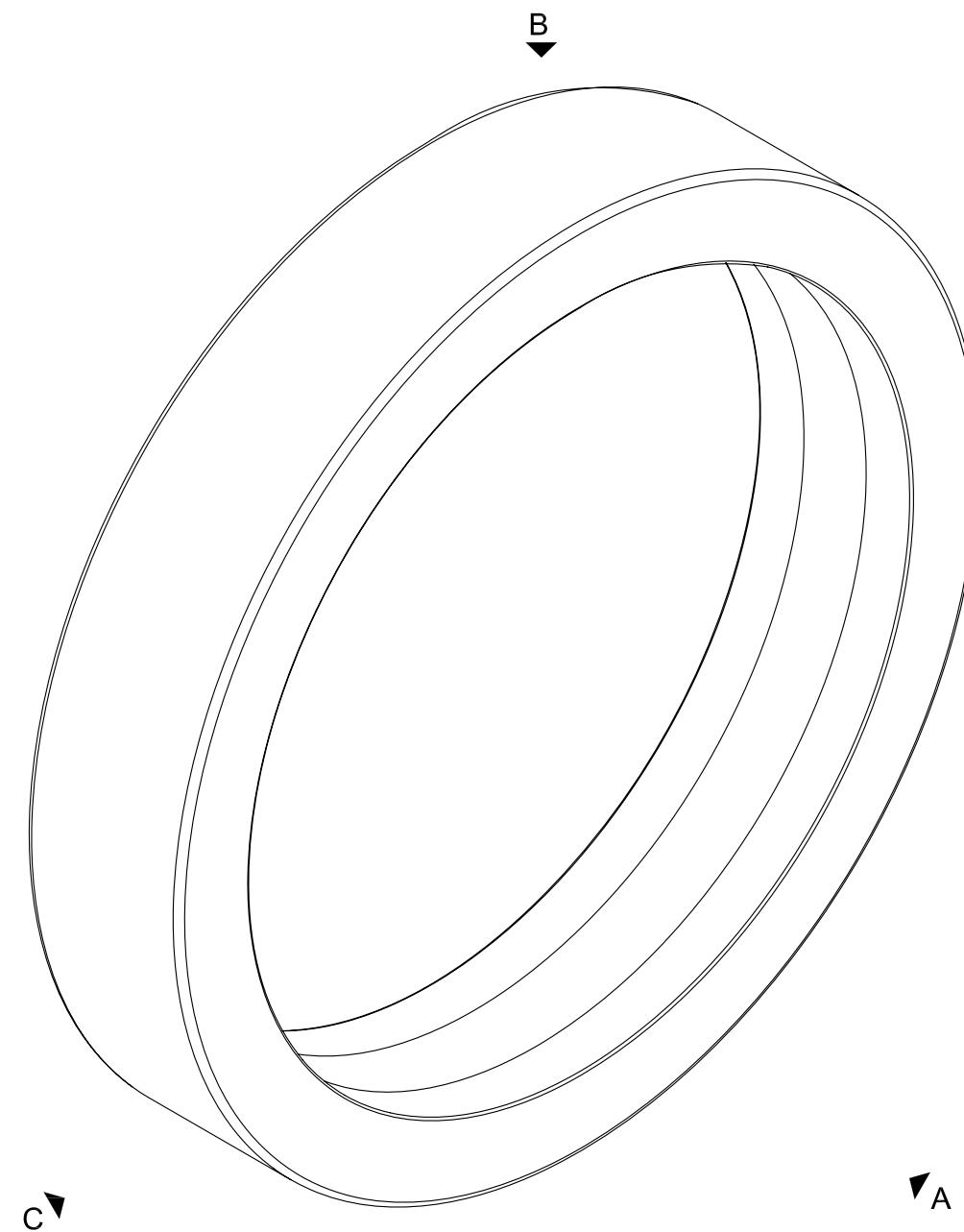
HYPER NEUROPROSTHETIC AND NEUROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
MUNICIPIO	LEGANÉS		
PROVINCIA	MADRID		

Plano Nº 03	MARCOS MARTÍNEZ REDONDO 	Versión 1 Fecha 13-08-2011	ESCALA 4/1
-----------------------	-----------------------------	-------------------------------------	---------------



VISTAS PIEZA 4. ANILLO EXTERIOR
ESCALA 4:1



ISOMÉTRICO PIEZA 4. ANILLO EXTERIOR
S/E

FECHA



PLANO
PIEZA 4. ANILLO EXTERIOR
DEL RODAMIENTO

HYPER
CONSOLIDER-INGENIO 2010

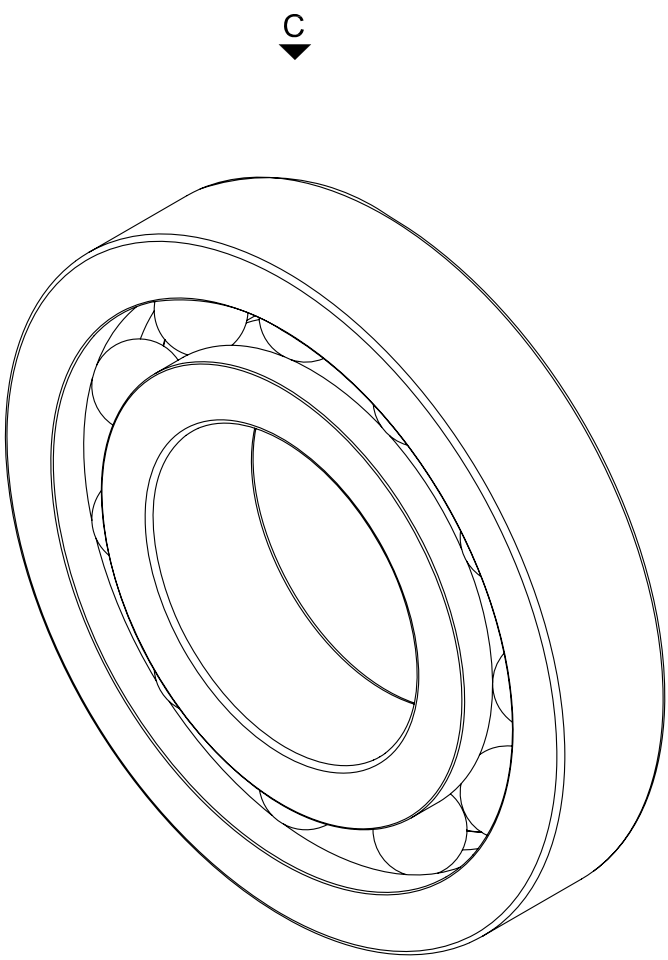
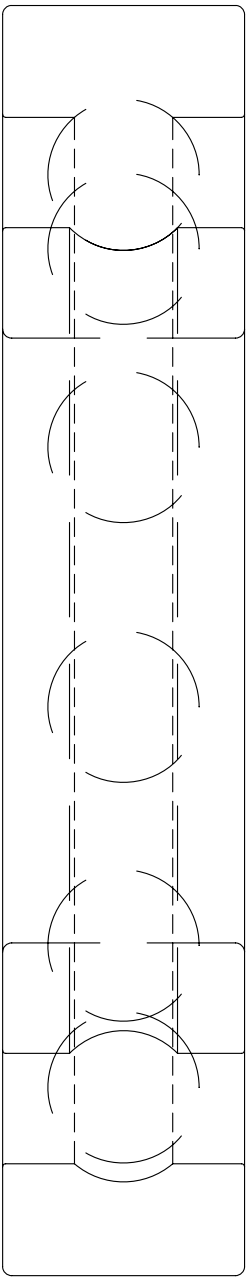
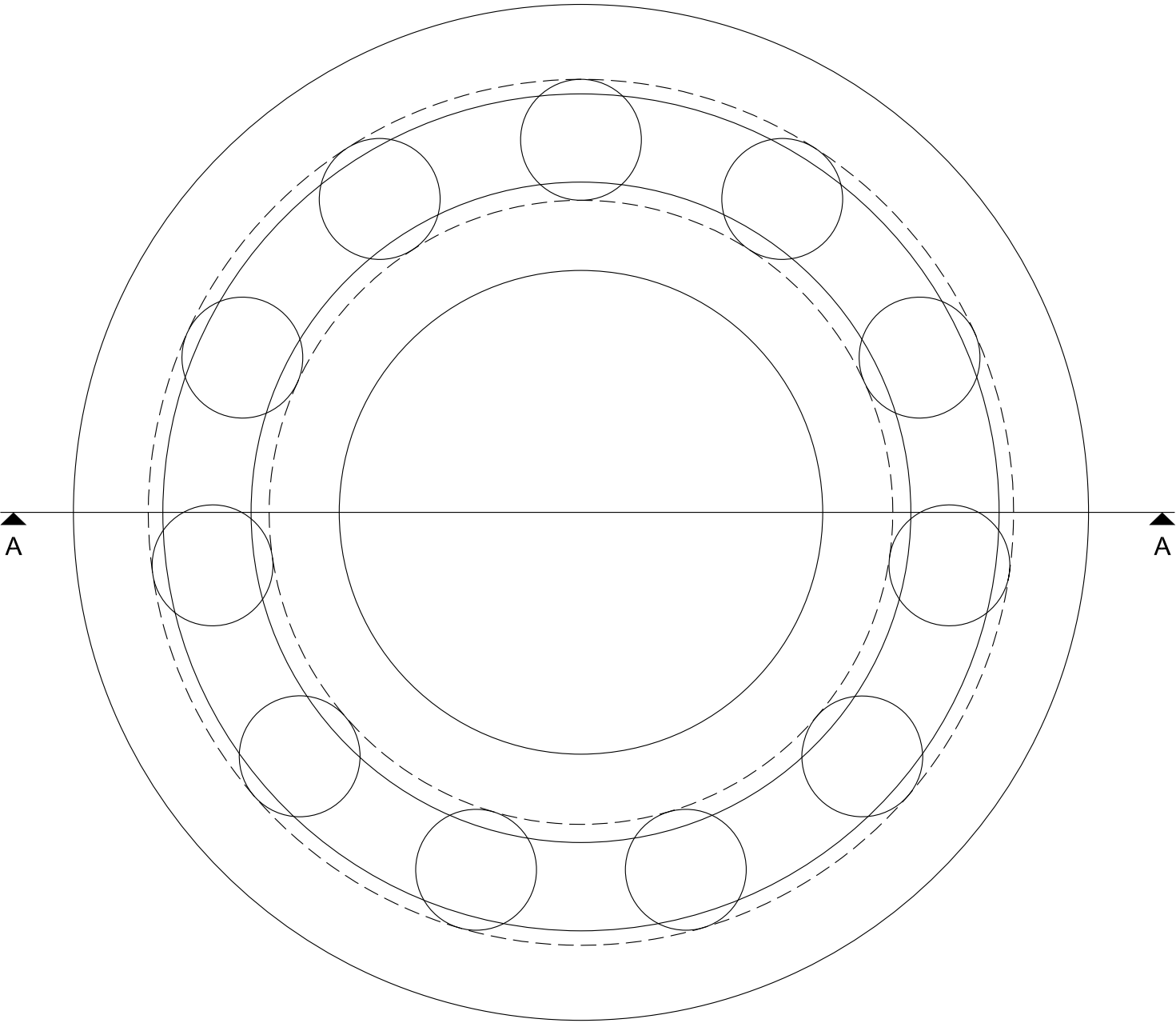
NEUROPROSTHETIC AND NEUROROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
MUNICIPIO	LEGANÉS		
PROVINCIA	MADRID		

Plano N° 04	MARCOS MARTÍNEZ REDONDO 	Versión 1 Fecha 13-08-2011	ESCALA 4/1
-----------------------	-----------------------------	-------------------------------------	---------------

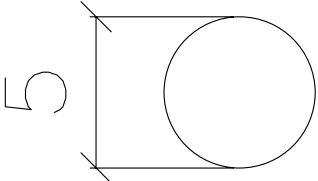
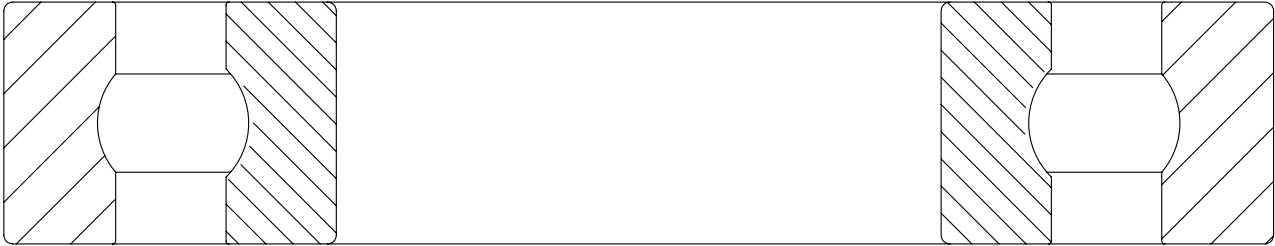
VISTA A

VISTA B



ISOMÉTRICO ENSAMBLADO 1. RODAMIENTO
ESCALA 2:1

VISTA C



RODAMIENTO

VISTAS ENSAMBLADO 1. ANILLO INTERIOR
ESCALA 4:1

FECHA



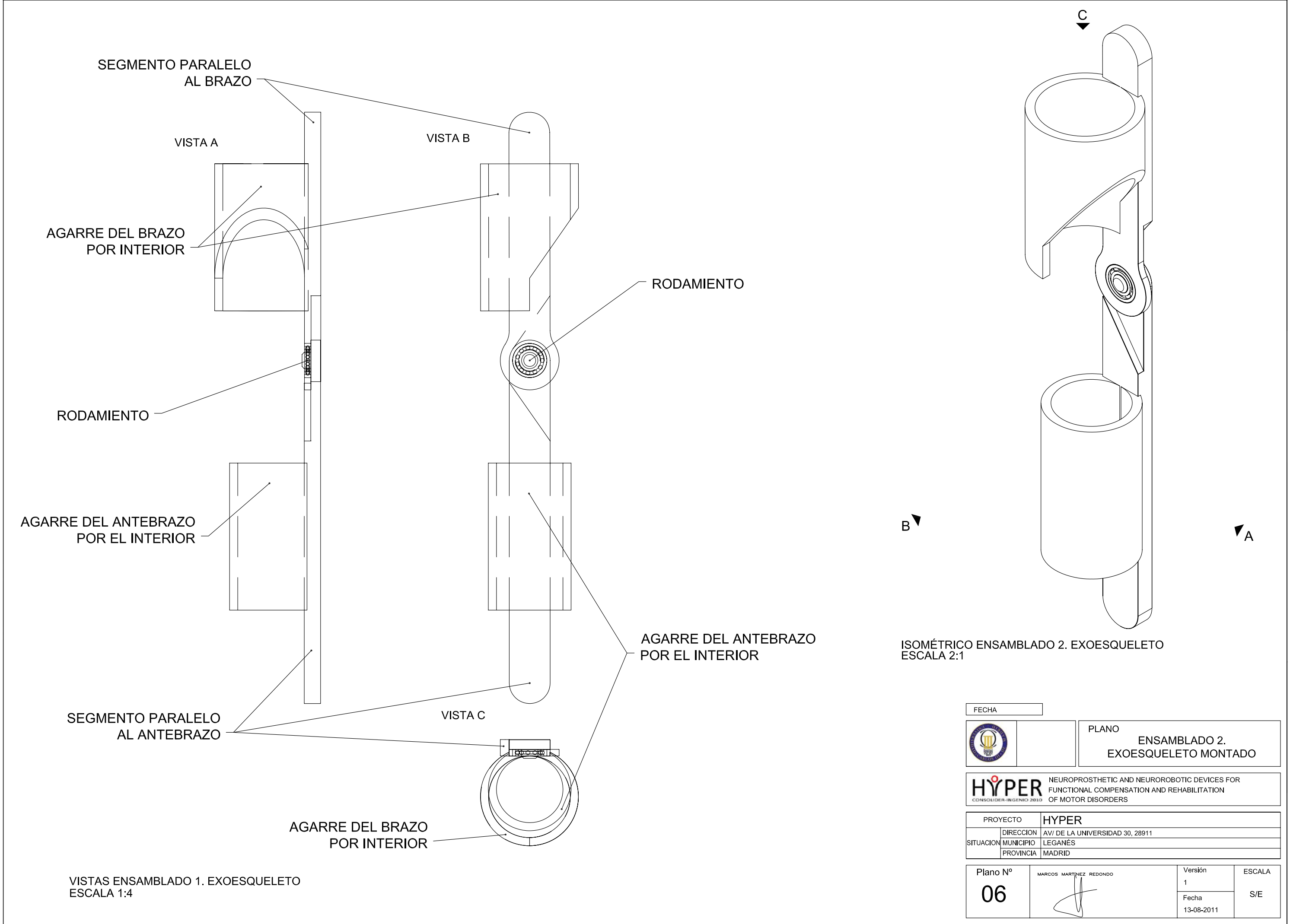
PLANO
ENSAMBLADO 1. RODAMIENTO
16004D



HYPER
CONSOLIDER-INGENIO 2010

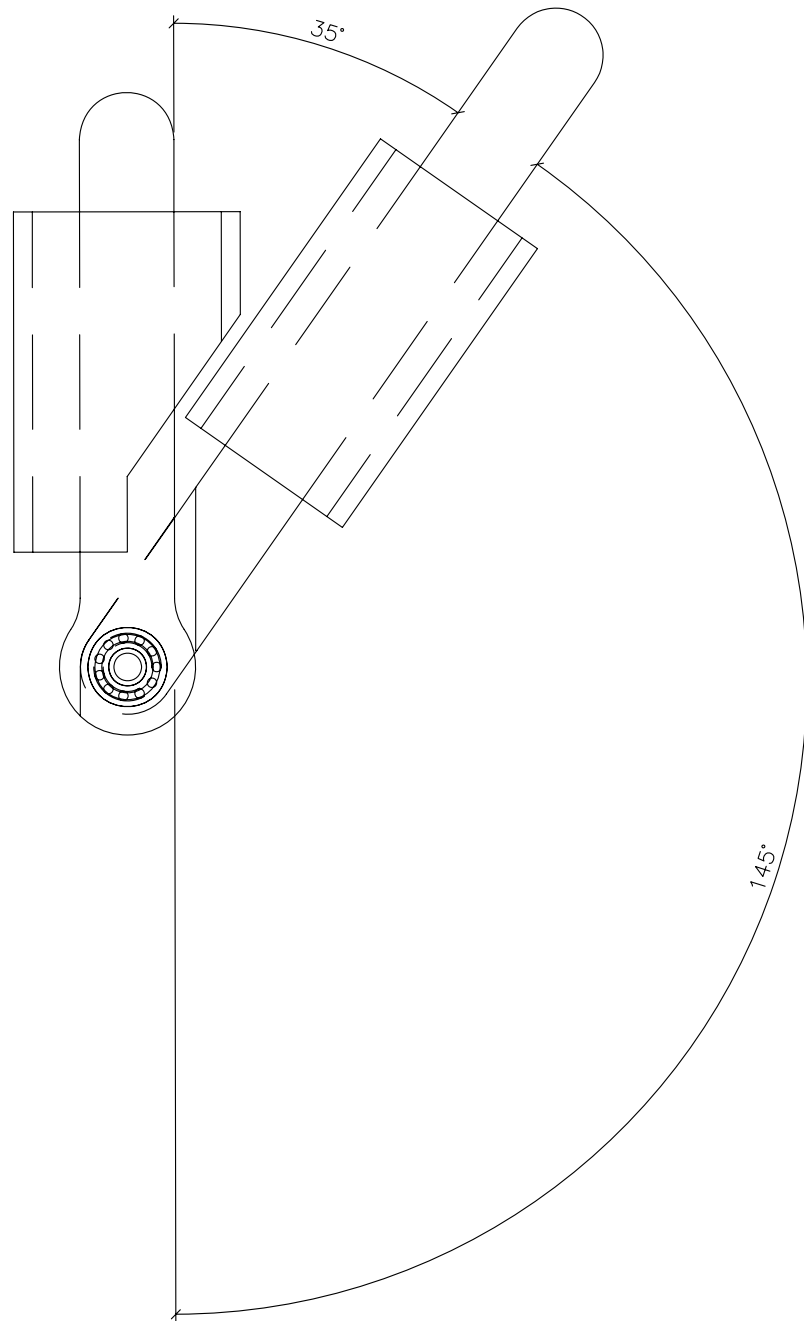
NEUROPROSTHETIC AND NEUROROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
SITUACION	MUNICIPIO LEGANÉS		
PROVINCIA	MADRID		

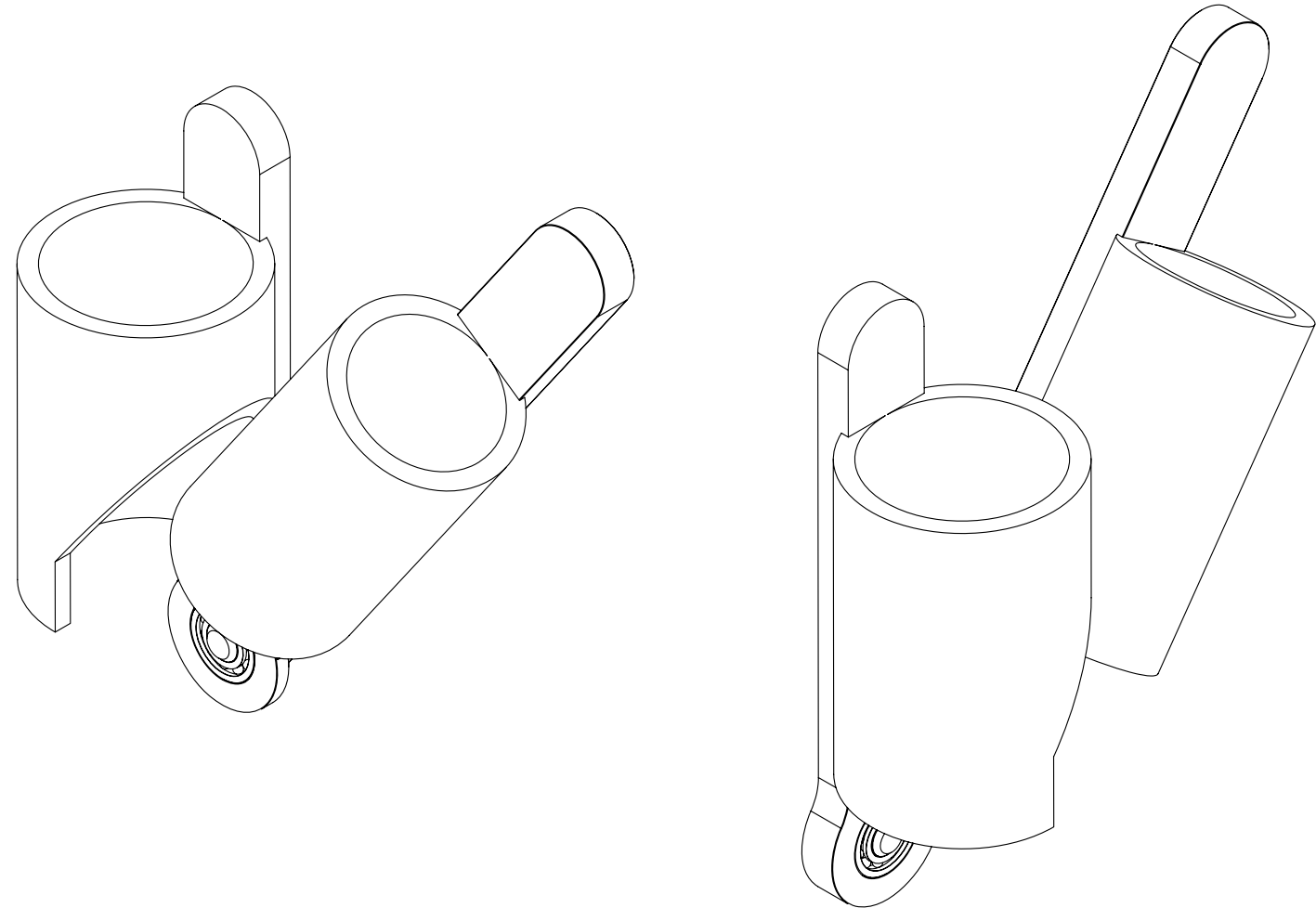
Plano Nº	MARCOS MARTINEZ REDONDO	Versión	ESCALA
05		1	S/E
		Fecha	
		13-08-2011	



FECHA		PLANO	
		ENSAMBLADO 2. EXOESQUELETO MONTADO	
		NEUROPROSTHETIC AND NEUROROBOTIC DEVICES FOR FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION OF MOTOR DISORDERS	
PROYECTO		HYPER	
DIRECCION		AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911	
SITUACION		MUNICIPIO	
		LEGANÉS	
		PROVINCIA	
		MADRID	
Plano Nº		Versión	
06		1	
		Fecha	
		13-08-2011	
		ESCALA	
		S/E	



VISTAS ENSAMBLADO 1. EXOESQUELETO
ESCALA 1:4



ISOMÉTRICO ENSAMBLADO 2. EXOESQUELETO
ESCALA 2:1

FECHA



PLANO ENSAMBLADO 2.
EXOESQUELETO MONTADO
RANGOS

HYPER NEUROPROSTHETIC AND NEUROROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

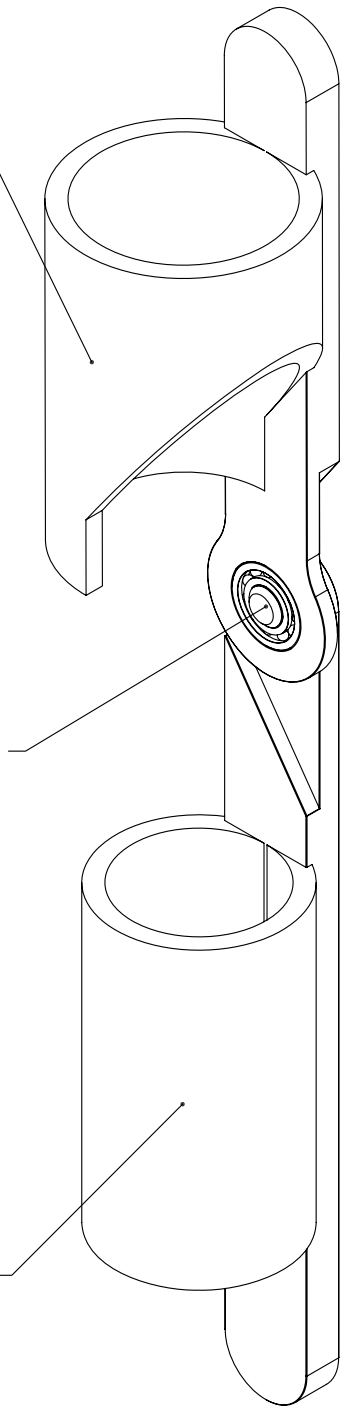
PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
MUNICIPIO	LEGANÉS		
PROVINCIA	MADRID		

Plano Nº	MARCOS MARTÍNEZ REDONDO	Versión	ESCALA
07		1	S/E
		Fecha	
		13-08-2011	

ALUMINIO 7075-T6

ACERO INOXIDABLE 420

ALUMINIO 7075-T6



ISOMÉTRICO ENSAMBLADO 2. EXOESQUELETO
ESCALA 1:4

ALUMINIO 7075-T6 (S.I.)	
DENSIDAD	2795
COEFICIENTE TÉRMICO	0.000024
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	121
CALOR ESPECÍFICO	920
MÓDULO DE ELASTICIDAD	71705000000
MÓDULO DE POISSON	0.33
TENSIÓN DE DEFORMACIÓN	503317000
TENSIÓN DE ROTURA	572265000

ACERO INOXIDABLE 420 (S.I.)	
DENSIDAD	7750
COEFICIENTE TÉRMICO	0.00001
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	25
CALOR ESPECÍFICO	502
MÓDULO DE ELASTICIDAD	199947953000
MÓDULO DE POISSON	0.29
TENSIÓN DE DEFORMACIÓN	344738000
TENSIÓN DE ROTURA	655002000

FECHA



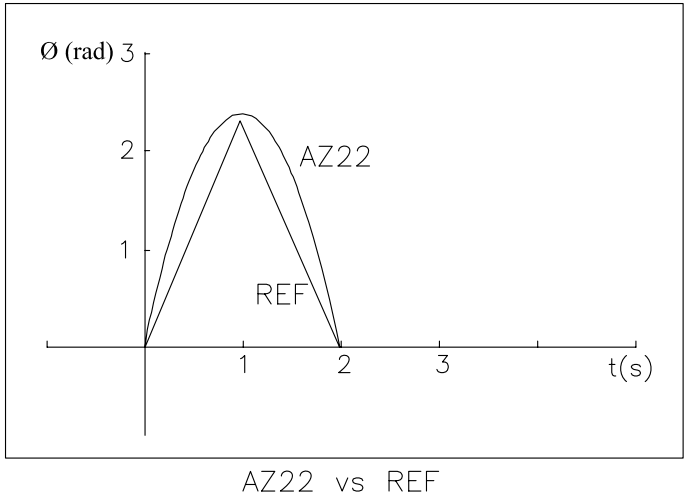
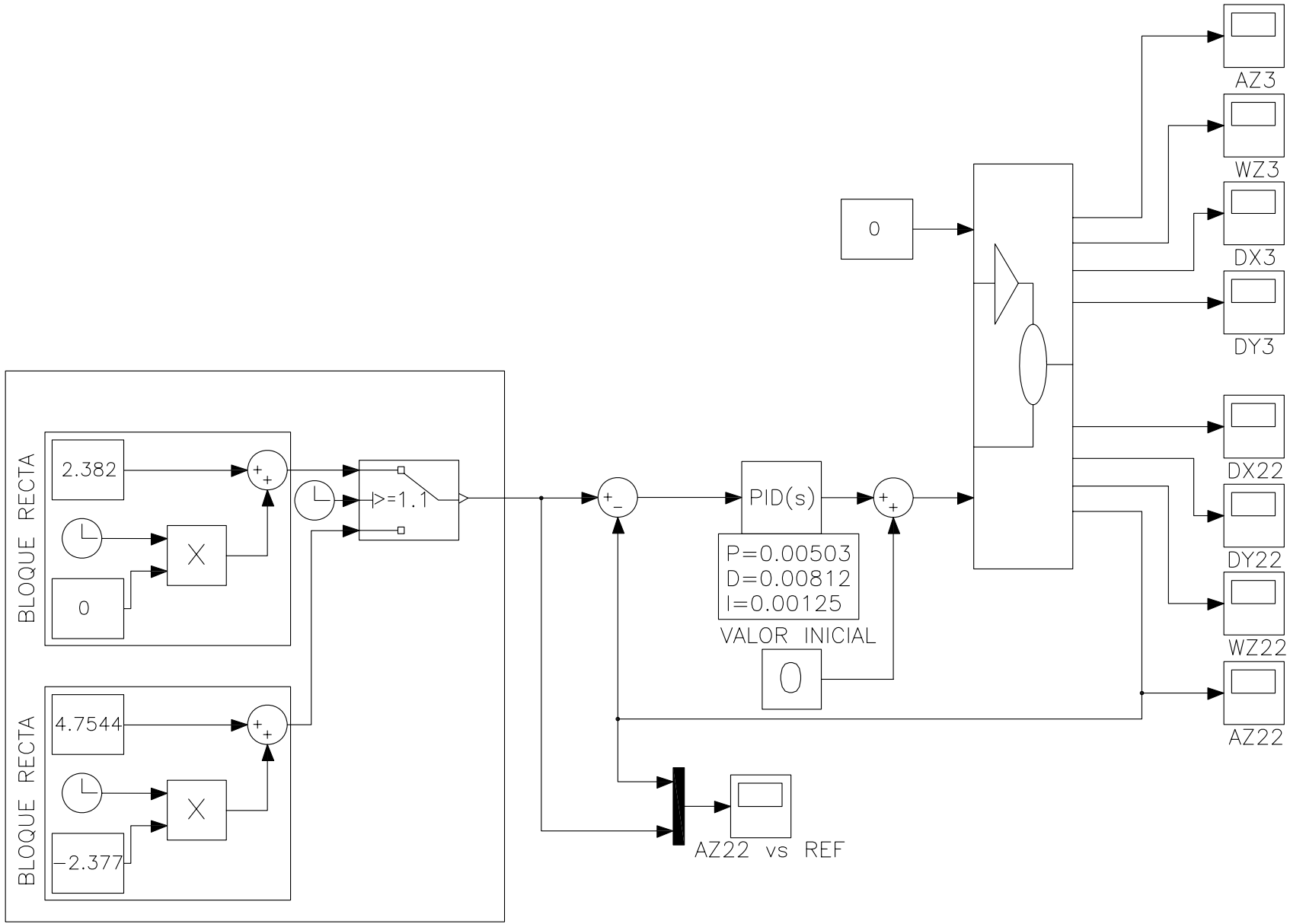
PLANO ENSAMBLADO 2.
EXOESQUELETO MONTADO
MATERIALES

HYPER NEUROPROSTHETIC AND NEUROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
MUNICIPIO	LEGANÉS		
PROVINCIA	MADRID		

Plano Nº	MARCOS MARTINEZ REDONDO	Versión	ESCALA
08		1	1:4
		Fecha	
		13-08-2011	

BLOQUE DE REFERENCIA PARA EL EXOANTEBRAZO



FECHA



PLANO
DIAGRAMA MATLAB A

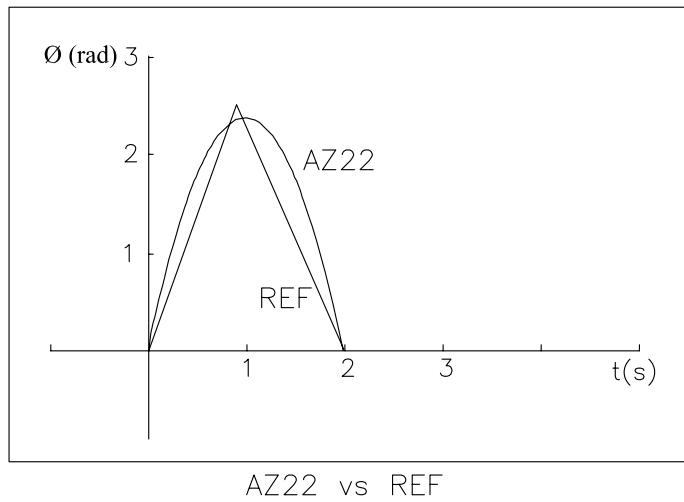
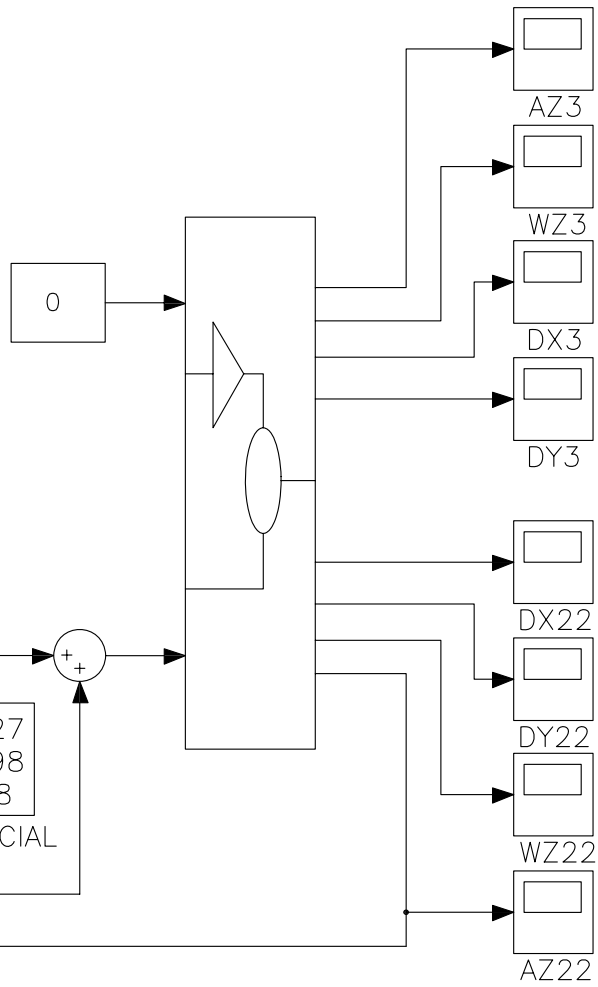
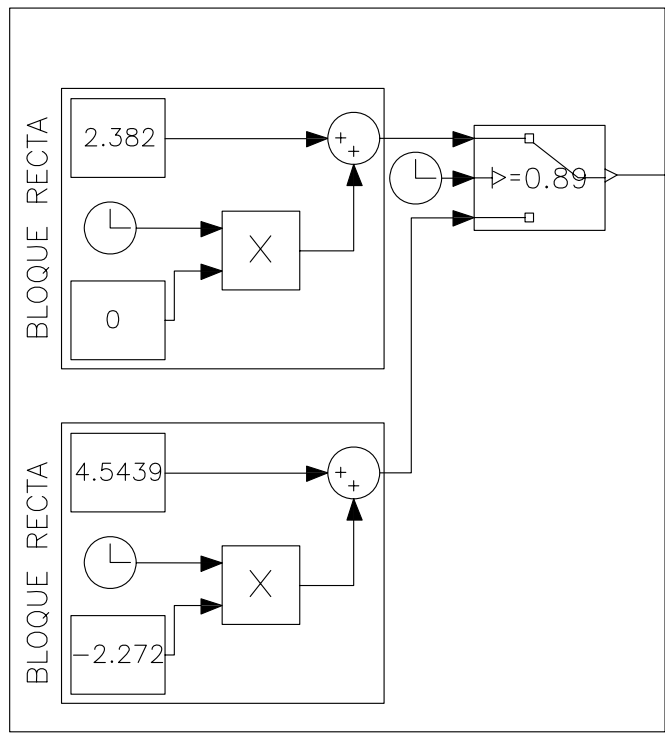
HYPER
CONSOLIDER-INGENIO 2010

NEUROPROSTHETIC AND NEUROROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
SITUACION	MUNICIPIO LEGANÉS		
PROVINCIA	MADRID		

Plano Nº 9	MARCOS MARTINEZ REDONDO 	Versión 1 Fecha 13-08-2011	ESCALA 1:4
----------------------	-----------------------------	-------------------------------------	---------------

BLOQUE DE REFERENCIA PARA EL EXOANTEBRAZO



FECHA



PLANO
DIAGRAMA MATLAB B

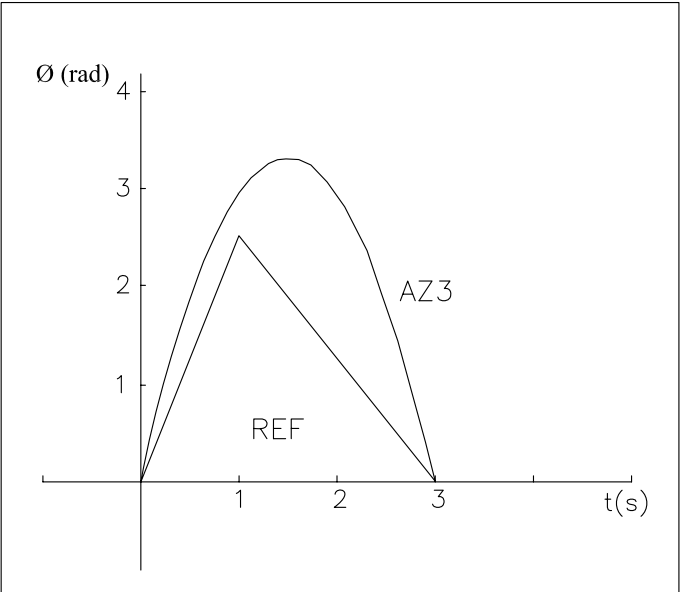
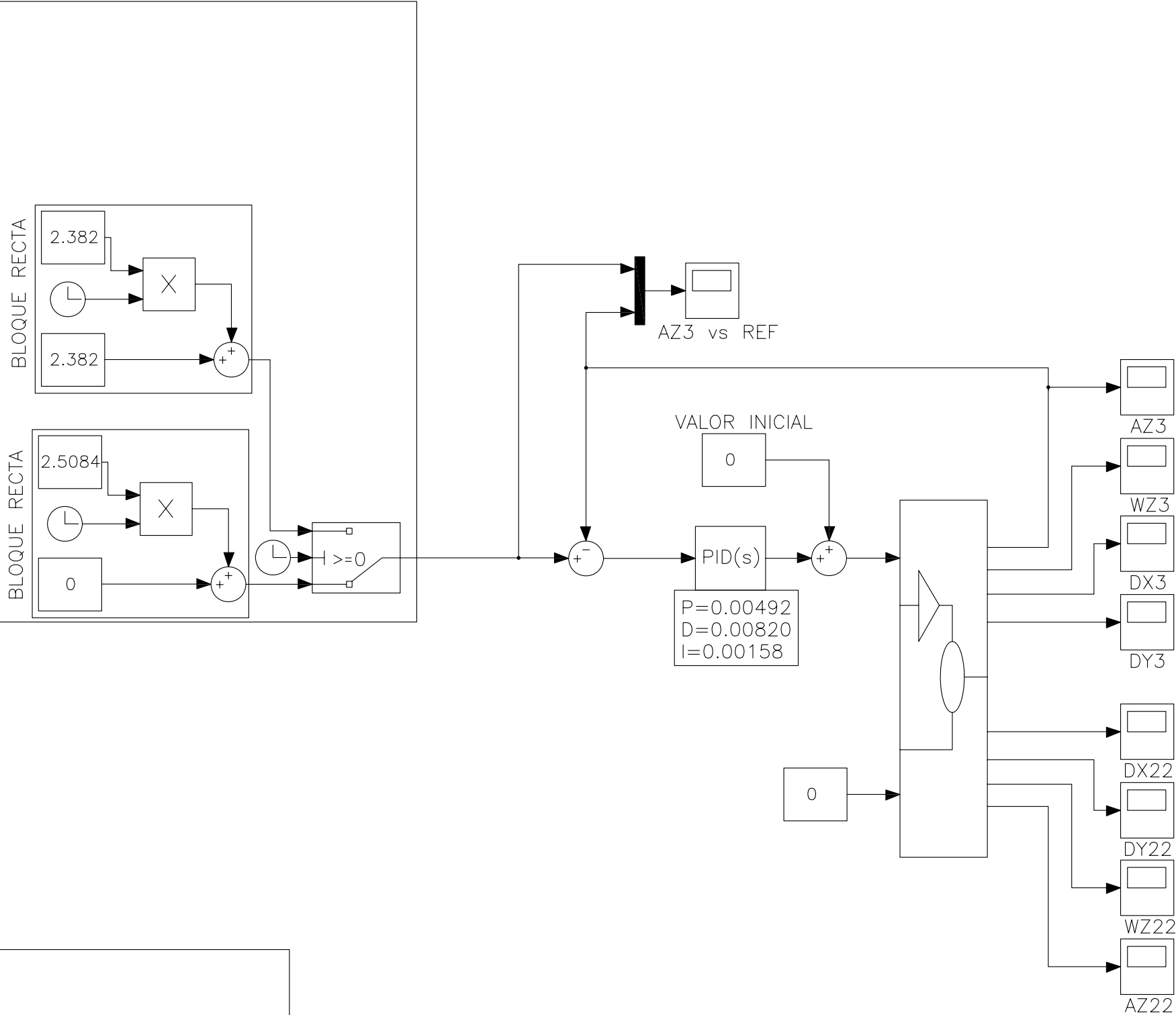
HYPER
CONSOLIDER-INGENIO 2010

NEUROPROSTHETIC AND NEUROROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
SITUACION	MUNICIPIO	LEGANÉS	
	PROVINCIA	MADRID	

Plano Nº 10	MARCOS MARTINEZ REDONDO 	Versión 1 Fecha 13-08-2011	ESCALA 1:4
-----------------------	-----------------------------	-------------------------------------	---------------

BLOQUE DE REFERENCIA PARA EL EXOBRAZO



AZ3 vs REF

FECHA



PLANO
DIAGRAMA MATLAB C

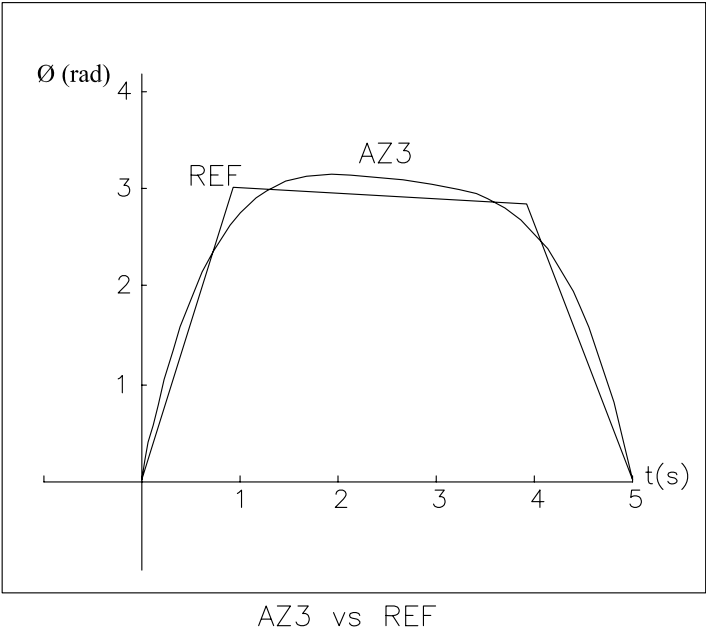
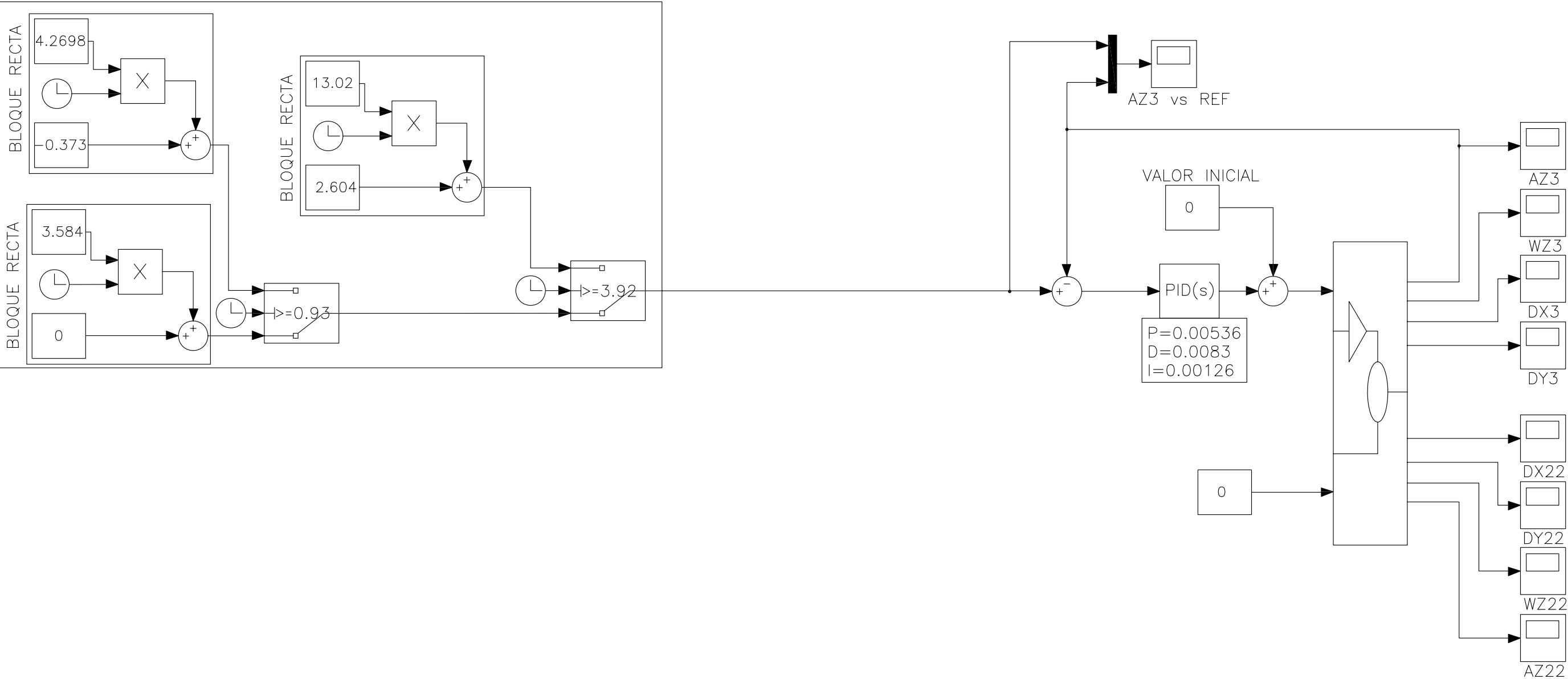
HYPER
CONSOLIDAR INGENIERO 2010

NEUROPROSTHETIC AND NEUROROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
SITUACION	MUNICIPIO LEGANÉS		
PROVINCIA	MADRID		

Plano Nº 11	MARCOS MARTINEZ REDONDO 	Versión 1 Fecha 13-08-2011	ESCALA 1:4
-----------------------	-----------------------------	-------------------------------------	---------------

BLOQUE DE REFERENCIA PARA EL EXOBRAZO



FECHA



PLANO
DIAGRAMA MATLAB D

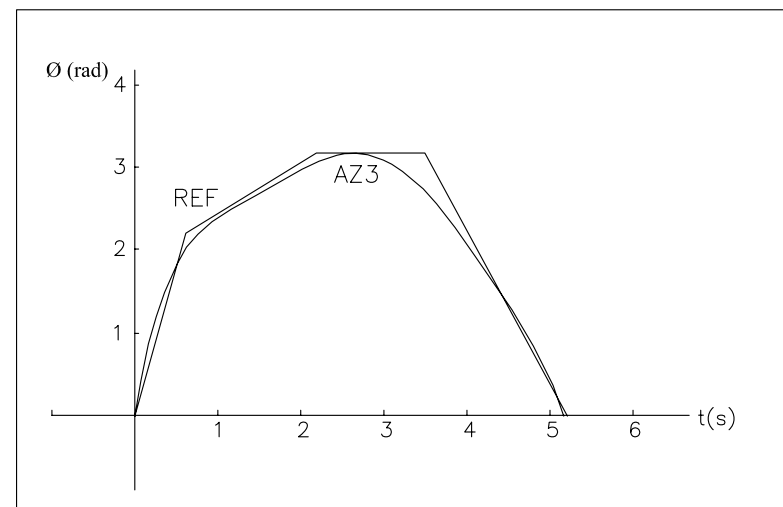
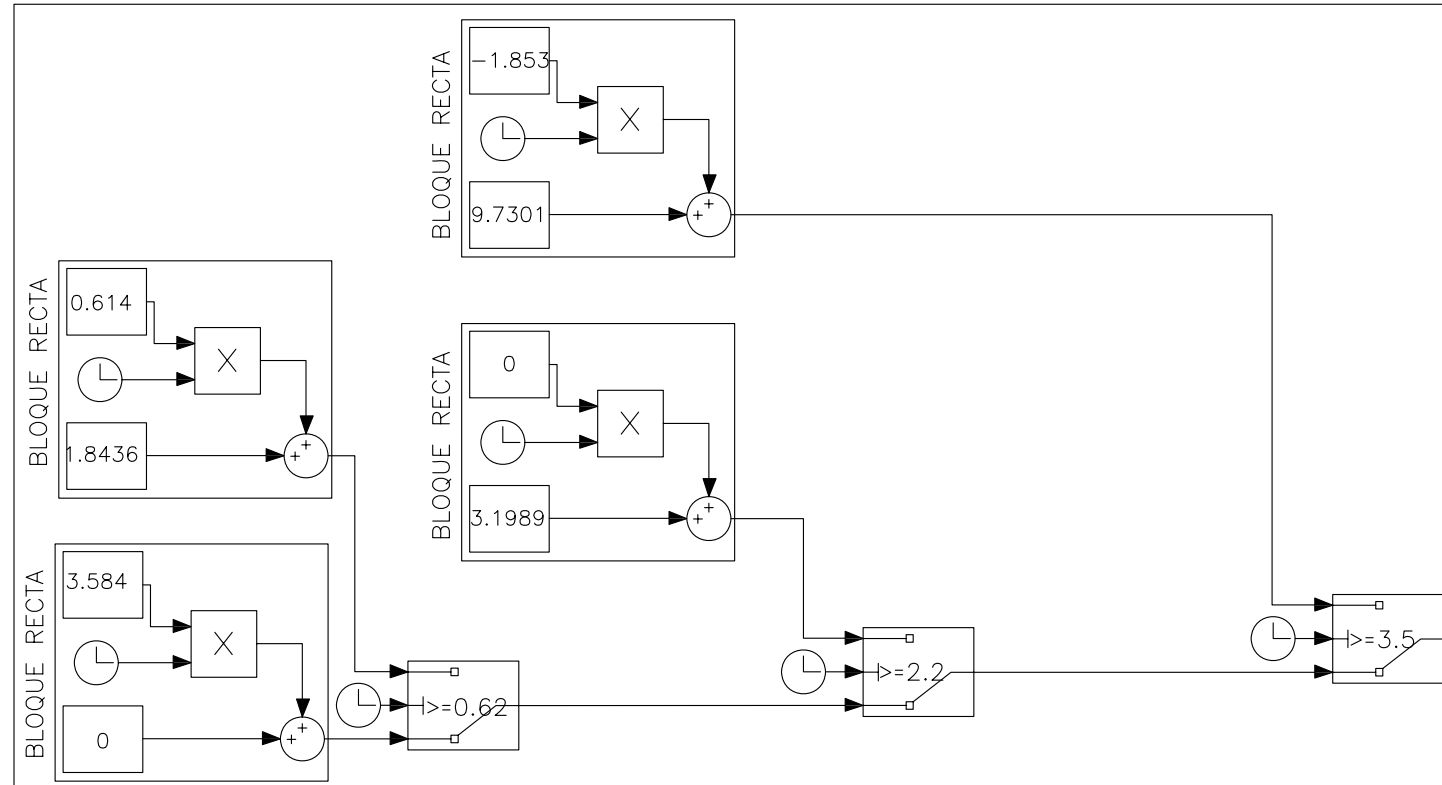
HYPER
CONSOLIDAR-INGENIO 2010

NEUROPROSTHETIC AND NEUROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

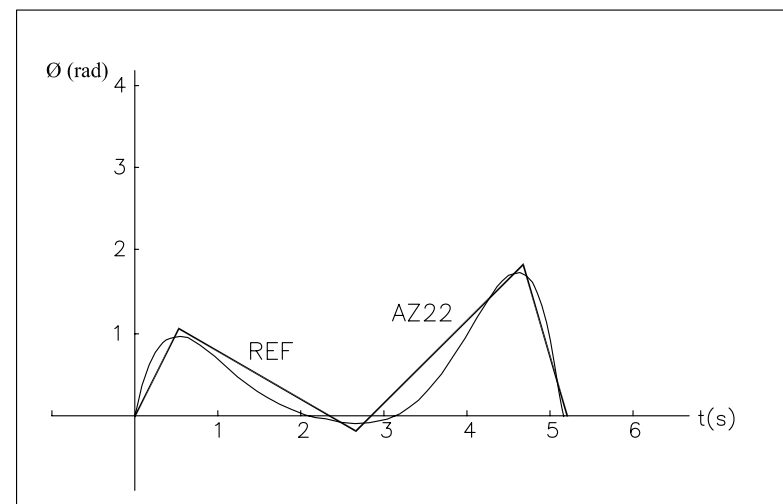
PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
MUNICIPIO	LEGANÉS		
PROVINCIA	MADRID		

Plano Nº 12	MARCOS MARTÍNEZ REDONDO 	Versión 1 Fecha 13-08-2011	ESCALA 1:4
-----------------------	-----------------------------	-------------------------------------	---------------

BLOQUE DE REFERENCIA PARA EL EXOBRAZO

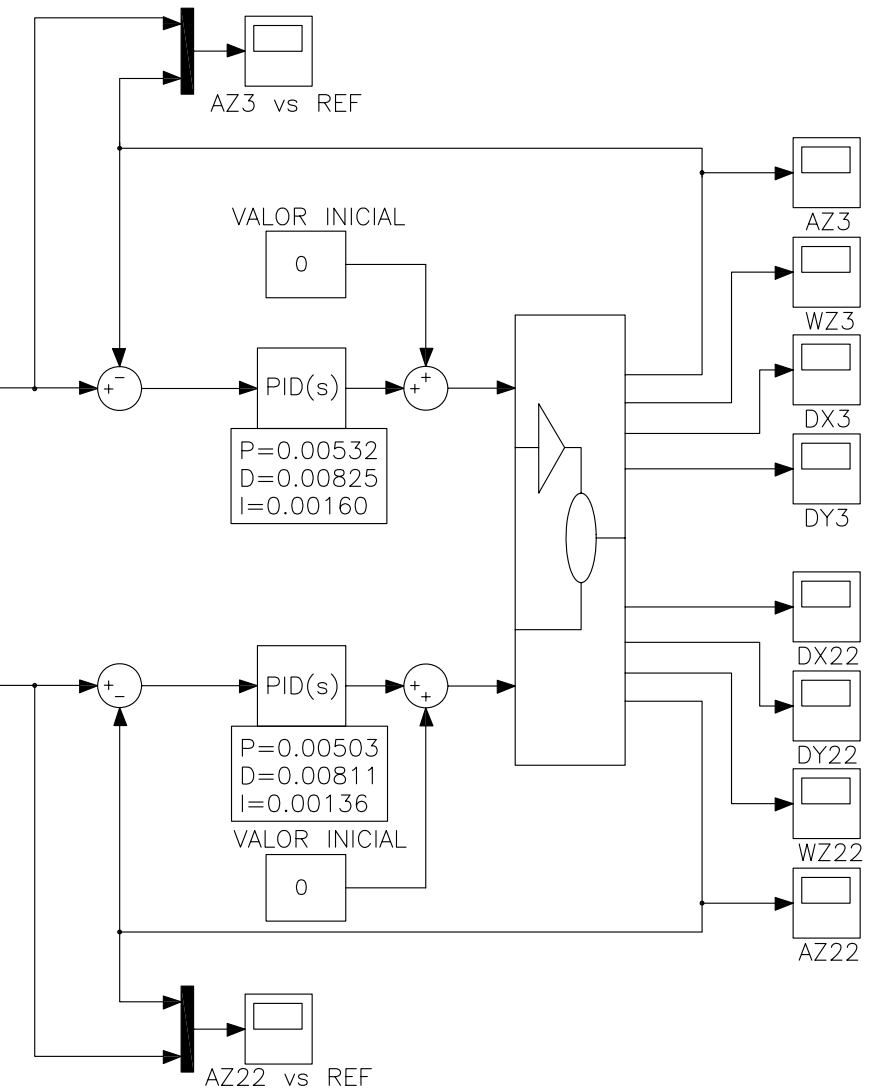
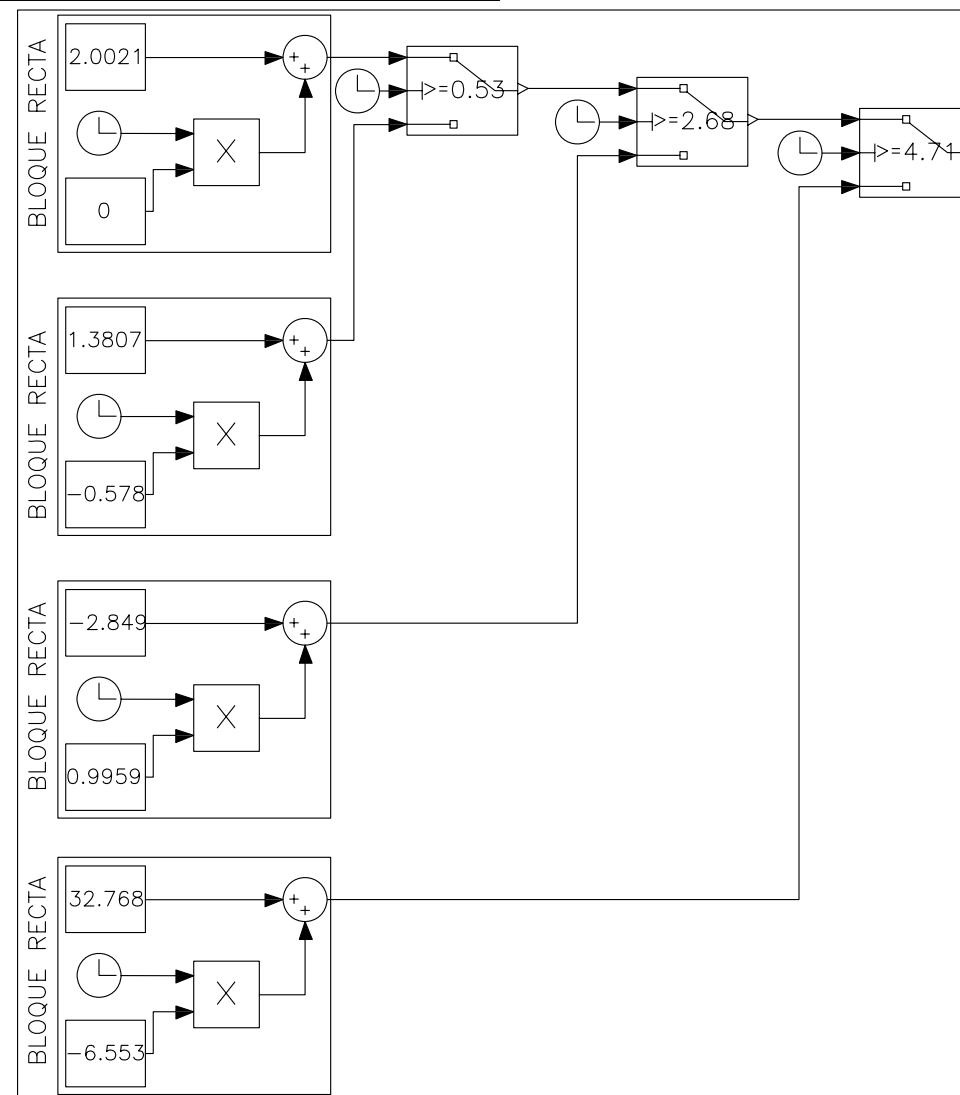


AZ3 vs REF



AZ22 vs REF

BLOQUE DE REFERENCIA PARA EL EXOANTEBRAZO



FECHA



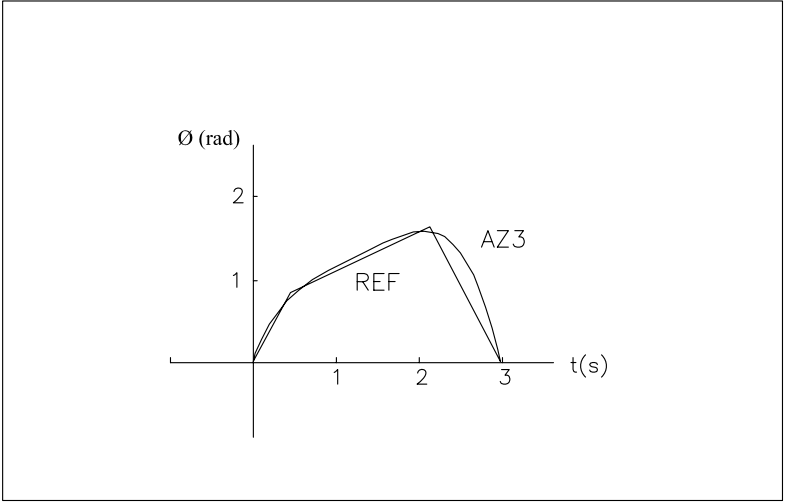
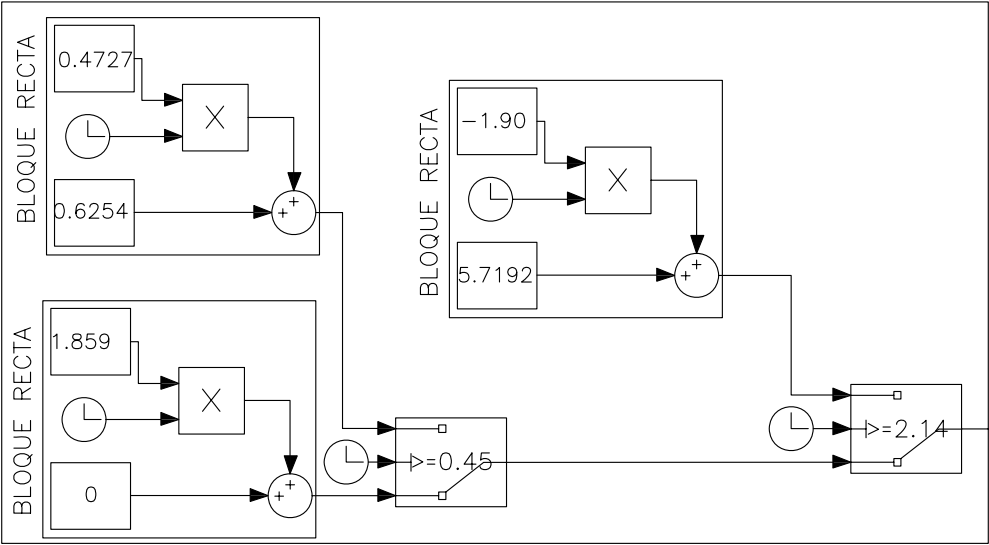
PLANO
DIAGRAMA MATLAB E

HYPER NEUROPROSTHETIC AND NEUROROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

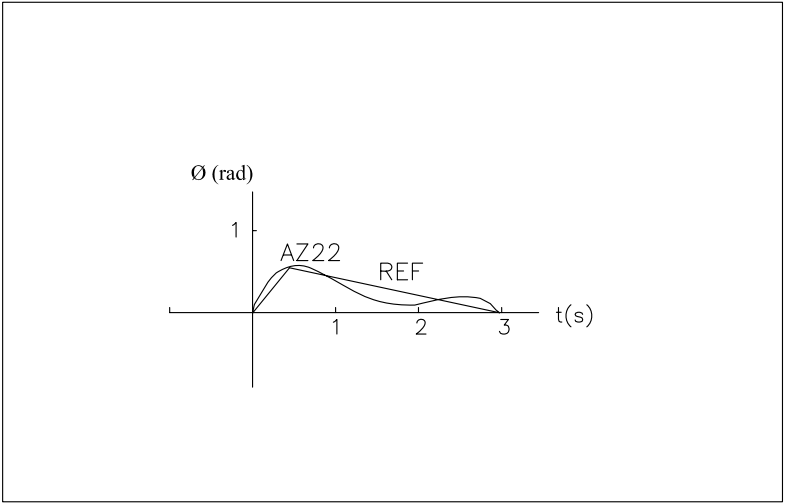
PROYECTO	HYPER
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911
SITUACION	MUNICIPIO LEGANÉS
PROVINCIA	MADRID

Plano Nº 13	MARCOS MARTÍNEZ REDONDO 	Versión 1 Fecha 13-08-2011	ESCALA 1:4
-----------------------	-----------------------------	-------------------------------------	---------------

BLOQUE DE REFERENCIA PARA EL EXOBRAZO

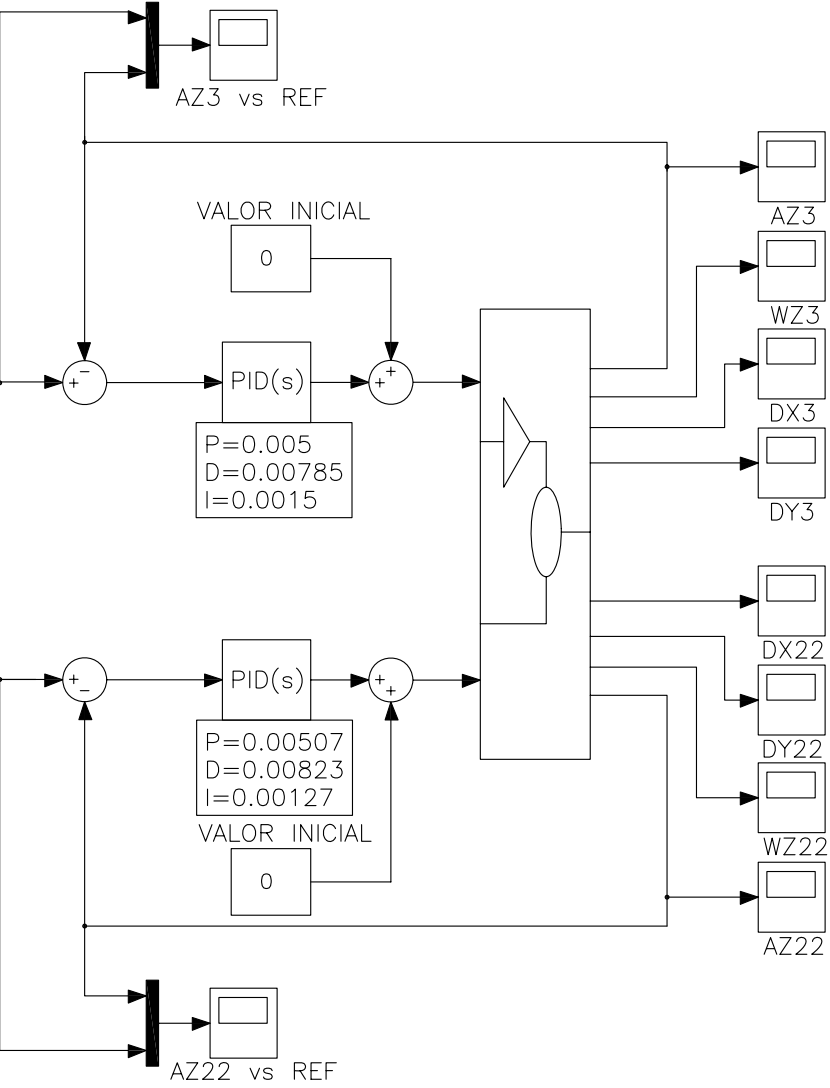
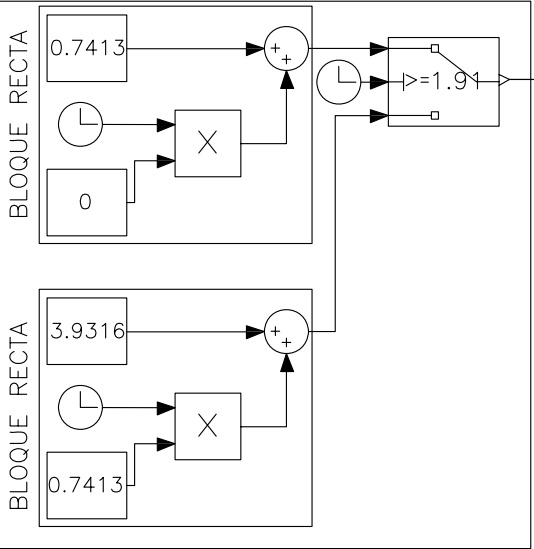


AZ3 vs REF



AZ22 vs REF

BLOQUE DE REFERENCIA PARA EL EXOANTEBRAZO



FECHA



PLANO
DIAGRAMA MATLAB F

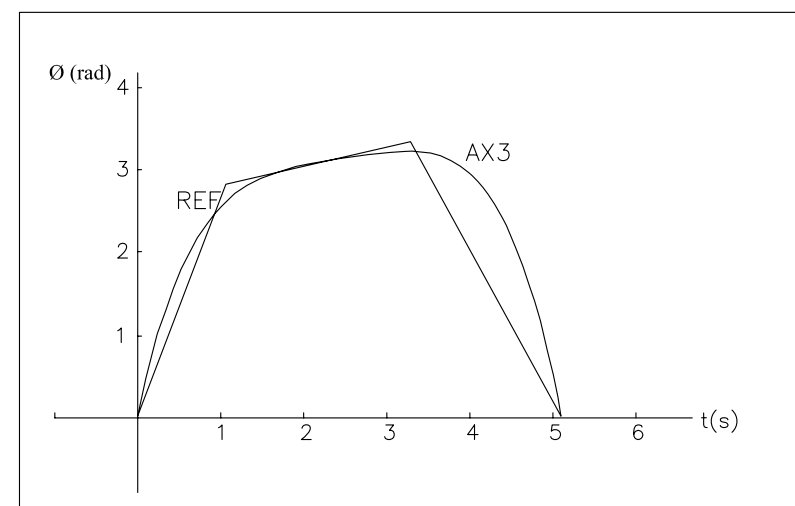
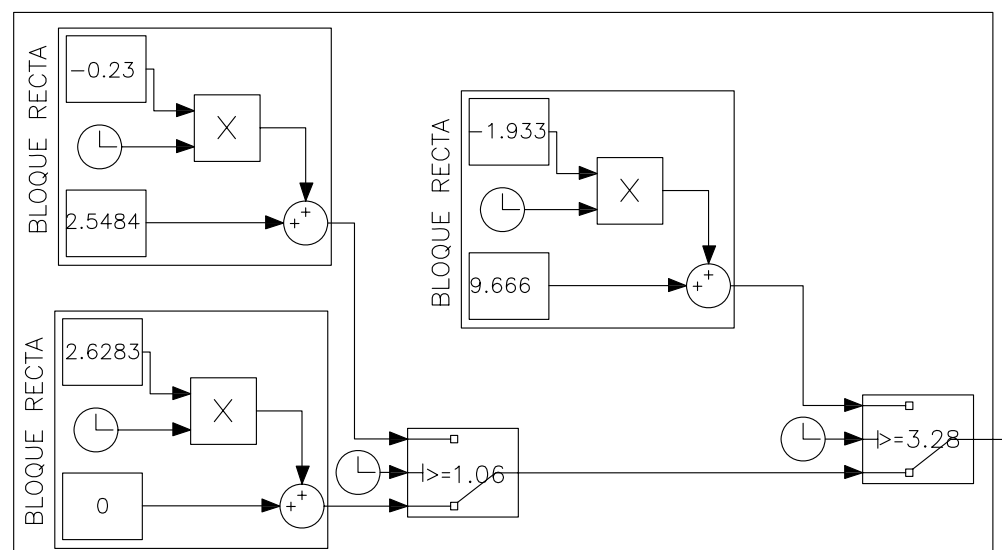
HYPER
CONSOLIDAR-INGENIO 2010

NEUROPROSTHETIC AND NEUROROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

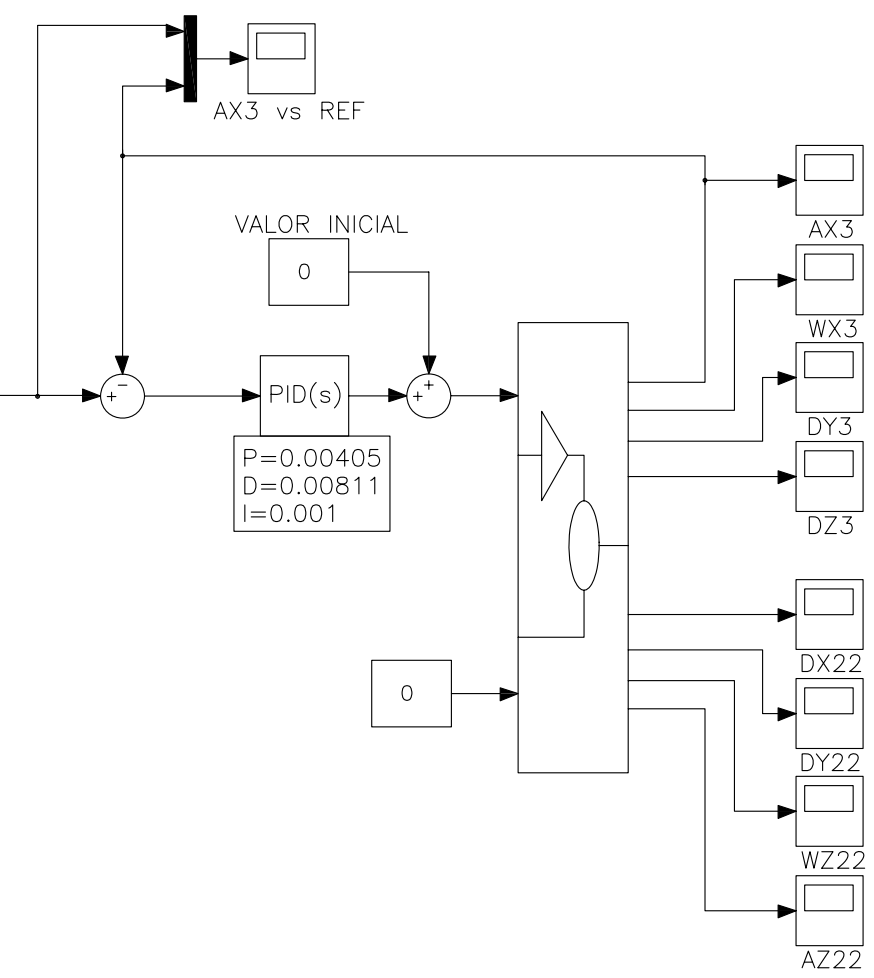
PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
MUNICIPIO	LEGANÉS		
PROVINCIA	MADRID		

Plano Nº 14	MARCOS MARTÍNEZ REDONDO 	Versión 1 Fecha 13-08-2011	ESCALA 1:4
-----------------------	-----------------------------	-------------------------------------	---------------

BLOQUE DE REFERENCIA PARA EL EXOBRAZO



AX3 vs REF



FECHA

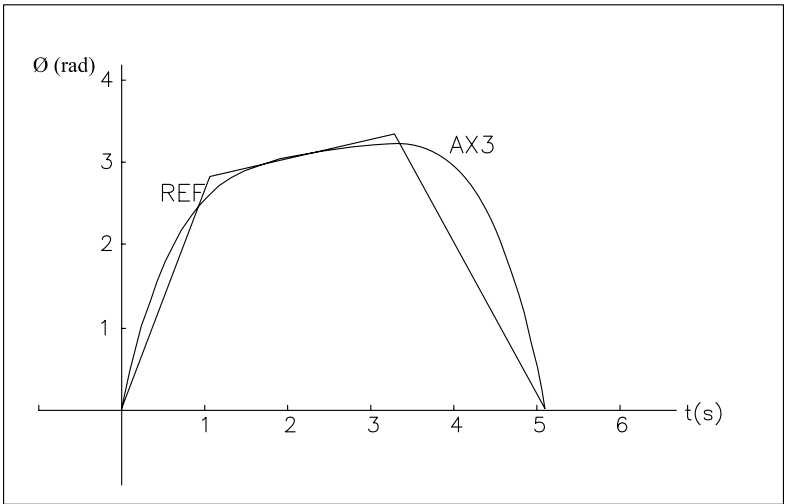


PLANO
DIAGRAMA MATLAB G

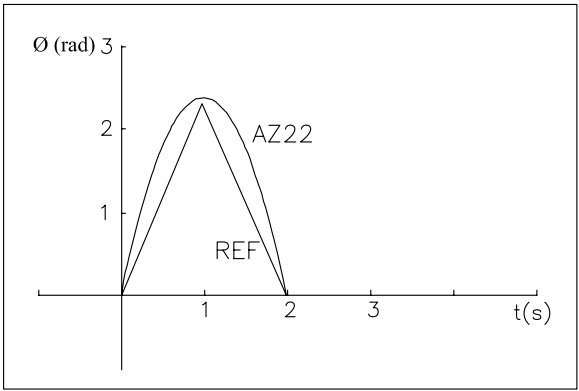
HYPER NEUROPROSTHETIC AND NEUROROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
MUNICIPIO	LEGANÉS		
PROVINCIA	MADRID		

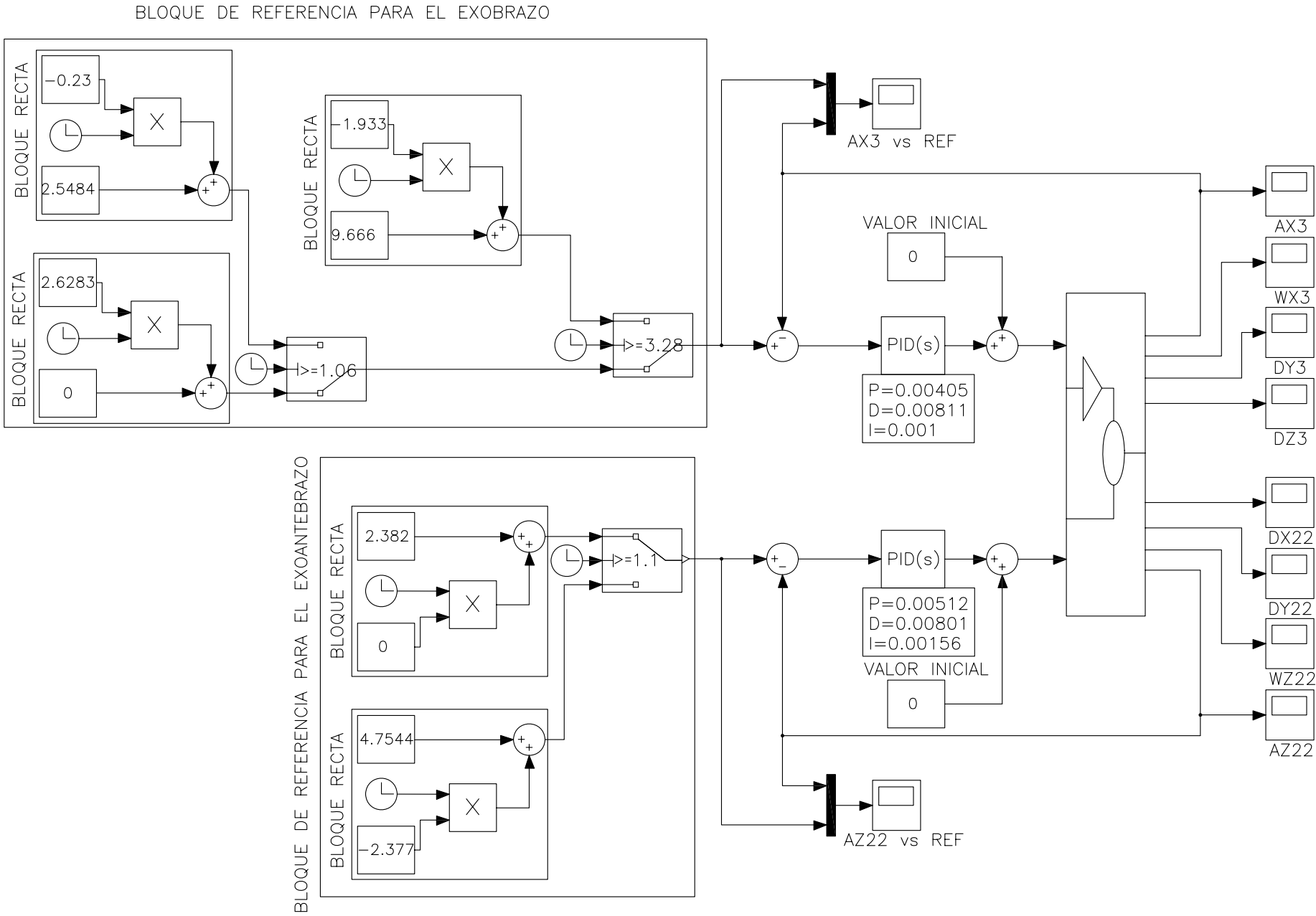
Plano Nº	MARCOS MARTINEZ REDONDO	Versión	ESCALA
15		1	1:4
		Fecha	
		13-08-2011	



AX3 vs REF



AZ22 vs REF



FECHA



PLANO
DIAGRAMA MATLAB H

HYPER
CONSOLIDER-INGENIO 2010

NEUROPROSTHETIC AND NEUROROBOTIC DEVICES FOR
FUNCTIONAL COMPENSATION AND REHABILITATION
OF MOTOR DISORDERS

PROYECTO	HYPER		
DIRECCION	AV/ DE LA UNIVERSIDAD 30, 28911		
SITUACION	MUNICIPIO LEGANÉS		
PROVINCIA	MADRID		

Plano Nº	MARCOS MARTÍNEZ REDONDO	Versión	ESCALA
16		1	1:4
		Fecha	
		13-08-2011	

ÍNDICE DE IMÁGENES

<u>CAPÍTULO I</u>	<u>Página</u>
Imagen 1.1. Logotipo del Proyecto HYPER	8
Imagen 1.2. Wearable Robot de la Universidad de Korea Fotografía del Korea Times [6]	13
Imagen 1.3. Robot cartesiano. Rangos de movimiento	17
Imagen 1.4. Robot cilíndrico Rangos de movimiento	17
Imagen 1.5. Robot polar o esférico Rangos de movimiento	18
Imagen 1.6. Robot articulado Rangos de movimiento Robot Adept Viper s650 [11]	18
Imagen 1.7. Robot SCARA Rangos de movimiento/Robot Cobra s600 [11]	19
Imagen 1.8. Robot Paralelo Delta [12] Rangos de movimiento Robot Adept Quattro s650H [11]	19
Imagen 1.9. Funcionamiento básico del sistema de control, los actuadores y las entradas y salidas del sistema	21
Imagen 1.10. Producción de par en un motor de corriente continua	22
Imagen 1.11. Motor de corriente alterna asíncrono	24
Imagen 1.12. Representación del funcionamiento básico del encoder	26
Imagen 1.13. Esquema simplificado de una neuroprótesis	13
Imagen 1.14. Esquema básico de la integración de neurorobots, neuroprótesis y sistema BMI	30
 <u>CAPITULO II</u>	 <u>Página</u>
Imagen 2.1. Esquema básico del procedimiento seguido.	37
 <u>CAPITULO III</u>	 <u>Página</u>
Imagen 3.1. Áreas de trabajo de Farley (mujeres) [cm] [20]	47
Imagen 3.2. Áreas de trabajo de Farley (hombres) [cm] [20]	47
Imagen 3.3. Áreas de trabajo propuestas por Barnes y Squires. [22]	48
Imagen 3.4. Planos del cuerpo humano	49
Imagen 3.5. Traslado al hombro	49
Imagen 3.6. Articulaciones acromioclavicular y hombro.	50
Imagen 3.7. Articulación del hombro.	51
Imagen 3.8. Movimientos en torno al eje transversal. Izquierda, extensión. Derecha, flexión.	52
Imagen 3.9. Movimientos de aducción. Aducción y extensión, izquierda. Aducción y flexión, derecha.	53
Imagen 3.10. Secuencia del movimiento de abducción	53
Imagen 3.11. Rotaciones longitudinales. Izquierda, rotación externa. Derecha y arriba, rotaciones internas.	54
Imagen 3.12. Rotaciones horizontales. Arriba, flexión horizontal. Centro, posición de referencia. Abajo, extensión horizontal.	55
Imagen 3.13. Vista anterior del codo [23]	56
Imagen 3.14. Vista posterior del codo que muestra las articulaciones humeroradial y humerocubital Olecranon process: proceso olecraneano; Olecranon fossa: fosa olecraneana [23]	57
Imagen 3.15. Articulación del codo de perfil	57
Imagen 3.16. Sección lateral del codo	58
Imagen 3.17. Movimientos de flexión y extensión. Izquierda, flexión. Derecha, extensión en la posición	59

de referencia.

Imagen 3.18. Movimientos de pronosupinación. Izquierda, supinación. Centro, posición de referencia. Derecha, pronación.	60
Imagen 3.19. Ejes y planos de movimiento de la muñeca. Eje AA', transversal. Eje BB', anteroposterior.	61
Imagen 3.20. Movimientos en torno al eje transversal. Izquierda, flexión. Centro, posición de referencia. Derecha, extensión.	62
Imagen 3.21. Movimientos en torno al eje anteroposterior. Izquierda, abducción. Dentro, posición de referencia. Derecha aducción.	62

CAPÍTULO IV

Página

Imagen 4.1. Modelo conceptual inicial y resultado final.	65
Imagen 4.2. Representación de la posición estática I.	68
Imagen 4.3. Diagrama de fuerzas de la posición I (a)	68
Imagen 4.4. Diagrama de fuerzas de la posición I (b)	69
Imagen 4.5. Diagrama de fuerzas de la posición I (c)	69
Imagen 4.6. Diagrama de fuerzas de la posición I (d)	70
Imagen 4.7. Representación de la posición estática II.	71
Imagen 4.8. Diagrama de fuerzas de la posición II (a)	71
Imagen 4.9. Diagrama de fuerzas de la posición II (b)	72
Imagen 4.10. Diagrama de fuerzas de la posición II (c)	73
Imagen 4.11. Diagrama de fuerzas de la posición III	75
Imagen 4.12. Representación de la posición estática III.	75

CAPÍTULO V

Página

Imagen 5.1. Ventana "View" de Solid Edge.	78
Imagen 5.2. Ventana "Sketching" de Solid Edge.	79
Imagen 5.3. Bloqueo del plano de trabajo.	80
Imagen 5.4. Operación de extruído.	80
Imagen 5.5. Operación de revolución.	81
Imagen 5.6. Operación de barrido.	81
Imagen 5.7. Evolución del dibujado de los bocetos en sus planos.	82
Imagen 5.8. Bocetos de trabajo.	82
Imagen 5.9. Operación y su resultado (a)	83
Imagen 5.10. Operación y su resultado (b)	83
Imagen 5.11. Operación de extruido.	84
Imagen 5.12. Operaciones y su resultado (c)	84
Imagen 5.13. Redondeado de puntos conflictivos.	85
Imágenes 5.14-19. Serie de operaciones necesarias para la construcción de la segunda pieza.	85
Imagen 5.20. Vista frontal e isométrica del rodamiento elegido.	86
Imagen 5.21. Vista "Relate" de Solid Edge.	86
Imagen 5.22. Ensamblado.	87
Imagen 5.23. Propiedades físicas del sólido "ExoBrazo".	87
Imagen 5.34. Propiedades físicas del sólido "ExoAntebrazo"	88

CAPÍTULO VI

Página

Imagen 6.1. Vista de las figuras generadas en ADAMS. Exobrazo y anillo exterior, exoantebrazo y anillo interior, y esferas de rodamiento.	94
Imagen 6.2. Exoesqueleto modelado.	95
Imagen 6.3. Panel de variables del sistema.	96

CAPÍTULO VII

Página

Imagen 7.1. Logotipo de MATLAB	100
Imagen 7.2. Plant Export	102
Imagen 7.3. Inicio de MATLAB	103
Imagen 7.4. Adams_sys.m	104
Imagen 7.5. Esquema básico del controlador PID.	105

CAPÍTULO VIII

Página

Imagen 8.1. Sistema de referencia del modelo.	107
Imagen 8.2. Representación de la colocación del motor.	114

CAPÍTULO IX

Página

Imagen C.1. Menú de inicio.	127
Imagen C.2. Espacio de trabajo y barra de tareas.	128
Imagen C.3. Main Toolbox.	129
Imagen C.4. Modo de vistas.	129
Imagen C.5. Otras opciones.	130
Imagen C.6. Creación de sólidos y operaciones entre ellos.	130
Imagen C.7. Sólidos.	131
Imagen C.8. Modificar la posición I.	134
Imagen C.9. Modificar la posición II.	134
Imagen C.10. Modificar las dimensiones de un sólido.	135
Imagen C.11. Juntas y actuadores.	136
Imagen C.12. Selección de elementos.	136
Imagen C.13. Menú para modificar juntas.	137
Imagen C.14. Menú de movimientos de precisión de juntas.	137
Imagen C.15. Cuadro de diálogo de actuadores.	139
Imagen C.16. Actuador.	139
Imagen C.17. Function Builder.	140
Imagen C.18. Creación de contacto entre piezas.	141
Imagen C.19. Panel de simulación.	142
Imagen C.20. Controles de la animación.	143
Imagen C.21. Main Toolbox.	144
Imagen C.22. Medida de un ángulo en función del tiempo.	144
Imagen C.23. Postprocesador	145
Imagen C.24. Exportación de datos y archivos	146
Imagen C.25. Grabación de animaciones	146



ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Página

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de actuadores.	21
Tabla 1.2. Tipos de actuadores.	21

CAPÍTULO III

Página

Tabla 3.1. Clasificación de las articulaciones.	44
Tabla 3.2. Rangos articulares del brazo humano.	46

CAPÍTULO IV

Página

Tabla 4.1. Tabla de datos necesarios para un modelo matemático sencillo del brazo humano.	66
Tabla 4.2. Datos de la masa para los distintos elementos del exoesqueleto.	66
Tabla 4.3. Resumen de resultados obtenidos para los momentos máximos.	76
Tabla 4.4. Resumen de los esfuerzos máximos en la estructura.	76
Tabla 6.1. Sólidos simples generadas en MSC.ADAMS.	

CAPÍTULO VI

Página

Tabla 6.1. Sólidos simples generados en MSC.ADAMS	90
Tabla 6.2. Declaración de variables en Adams.	97
Tabla 6.3. Sólidos que componen el modelo en Adams.	97

CAPÍTULO VIII

Página

Tabla 8.1. Resumen de resultados de las simulaciones.	112
---	-----

Tabla 8.2. Tabla con las especificaciones básicas de los motores óptimos para el modelo.	114
--	-----

ANEXO A**Página**

Tabla A.1. Dimensiones del rodamiento 16004.	120
Tabla A.2. Capacidad de carga del rodamiento 16004.	120
Tabla A.3. Condiciones de lubricación.	121
Tabla A.4. Masa del rodamiento.	121
TablaA.5. Características del acero 420. [28]	121

ÍNDICE DE GRÁFICAS

CAPÍTULO IV

Páginas

Gráfica 4.1. Obtención de datos sobre el codo.	76
Gráfica 4.2. Obtención de datos sobre el hombro.	76

ANEXO D

Páginas

Gráfica D.1-7. Gráficas del movimiento tipo A	147 - 150
Gráfica D.8-14. Gráficas del movimiento tipo B	150 - 153
Gráfica D.15-23. Gráficas del movimiento tipo C	153 - 157
Gráfica D.24-31. Gráficas del movimiento tipo D	157 - 161
Gráfica D.32-40. Gráficas del movimiento tipo E	161 - 165
Gráfica D.41-49. Gráficas del movimiento tipo F	166 - 169
Gráfica D.50-58. Gráficas del movimiento tipo G	170 - 173
Gráfica D.59-74. Gráficas del movimiento tipo H	174 - 180

BIBLIOGRAFÍA

1. "Memoria Técnica del Programa de Actividad Investigadora" del proyecto HYPER
2. Biblioteca Nacional de Medicina de EEUU (online)
3. NINDS, National Institute of Neurological Disorders and Stroke
4. HYPER-Memo-v2.0
5. "Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons" José L. Pons, pag.1,2 ISBN 978-0-470-51294-4 (HB)
6. Hong Soon-pyo, funcionario de la oficina de revisión de la KIPO, Korean Intellectual Property Office en el Korea Times, (5/10/2010), artículo "Yo soy Iron Man: wearable robots gain traction, http://www.koreatimes.co.kr/www/news/biz/2010/10/123_65640.html
7. IFESS, *International Functional Electrical Stimulation Society*, en su página web
8. RAE, versión online, búsqueda "robot"
9. Apuntes de la asignatura Fundamentos de Automatización Industrial (FAI), de la I.T.I. Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, año 2008.
10. FAI, <http://www.monografias.com/trabajos10/robap/robap.shtml#auto>; <http://prime.jsc.nasa.gov/ROV/types.html>
11. www.adeptiberica.com
12. US4976582: Device for the movement and positioning of an element in space
13. Apuntes Introducción a la electrónica de potencia, Universitat de València Sensores y Actuadores Industriales, Universidad de Vigo Automatización Industrial, Universidad Carlos III de Madrid Teoría de las Máquinas asíncronas, Universidad de Cantabria
14. Kawato M: From "Understanding the brain by creating the brain" toward Manipulative Neuroscience." *Philosophical Transactions of the Royal Society B* (2007) Shidara M, Kawano K, Gomi H, Kawato M: Inverse-dynamics model eye movement control by Purkinje cells in the cerebellum. *Nature* 365, 50-52(1993)
15. Scholarpedia doi:10.4249/scholarpedia.1365
16. Neuroprótesis. Verena Ahne. *Mente y Cerebro*, nº 22. Enero de 2007
17. D. Blanco, B. L. Boada, and L. Moreno, "Localization by Voronoi Diagrams Correlation" en *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, Korea, 2001.
18. I.A. Kapandji, Cuadernos de fisiología articular, 4ª Edición, Tomo 1, Edit.MASSON 1996
19. W. Schneider, H. Spring, T. Tritschler "Mobility, theory and practice" Edit THIEME 1992
20. F.Ferrer, G. Minaya, J.Niño, M. Ruiz "Manual de ergonomía" Edit. FUNDACIÓN MAPFRE, 1995.
21. Estrada J. Ergonomía. Introducción al análisis del trabajo. Medellín: Universidad de Antioquia; 1994
22. "Factores humanos en ingeniería y Diseño, Capítulo: Antropología aplicada y espacio de trabajo" - ERNEST MC.CORMICK
23. Measurement of Joint Motion, A Guide to Goniometry, F.A.Davis Company 3ª edición P.91
24. <http://www.zkl.cz/es>
25. http://www.skf.com/portal/skf_es/home.
26. FAG Sales Europe Iberia España, Una sucursal de FAG Kugelfischer Georg Schäfer AG
27. www.kollmorgen.com
28. Biblioteca de materiales de Solid Edge
29. <http://www.globe-benelux.nl/produkt>



30. Diseño de una herramienta con Matlab para la adquisición y procesamiento de señales: aplicación a sistema de detección de fallos de rodamientos PFC Álvaro Sanz Arranz